

平成 26 年度 修士論文

屋外三角堰における光合成生物の成長とその抑制

高水 敦史

首都大学東京
理工学研究科 機械工学専攻
指導教員 水沼博教授

第1章 緒論

1-1. 下水処理工程と処理場での問題点	3
1-2. 一般的な付着生物の問題及びその対策	5
1-3. 本研究の目的	6

第2章 現場調査

第3章 実験装置及び実験方法

3-1. 三角堰水槽	13
3-2. 実験条件	15
3-3. 三角堰への光合成生物の付着実験	16
3-3-1. 三角堰表面のぬれと付着	16
3-3-2. 三角堰表面の照度分布と付着	22
3-4. 三角堰への光合成生物の付着抑制実験	23
3-4-1. 表面処理による付着抑制	23
3-4-2. 三角堰形状による三角堰表面のぬれ抑制	29
I. ひさしの設置	29
II. 曲げ部を持つ三角堰	31

第4章 実験結果及び考察

4-1. 三角堰水槽沈殿地再現特性	35
4-2. 三角堰への光合成生物の付着	40
4-2-1. 表面のぬれの効果	40
4-2-2. 三角堰表面の照度分布	47
4-3. 三角堰への光合成生物の付着抑制	50
4-3-1. 表面処理による付着抑制	50
4-3-2. 三角堰形状による三角堰表面のぬれ抑制	56
I. ひさしの設置	56
II. 曲げ部を持つ三角堰	59

第5章 結論

・参考文献	66
・謝辞	67
・付録	6

・第1章 緒論

1-1. 下水処理工程と処理場での問題点

下水処理は汚水を処理して清涼で衛生的で安全な処理水を放流することを目的としている^[1]。しかし、その処理過程では大量の汚泥（汚濁物のかたまり）が発生し、その汚泥も併せて処理することが下水処理と言われている。

下水処理の処理過程は、一次処理、二次処理、高度処理に分けられる。一次処理では、下水中の汚濁物を沈殿および浮上させることで物理学的に処理している。二次処理では、微生物を利用して生物学的に有機物を除去している。高度処理では、一・二次処理では十分に除去できなかった有機物や窒素、リンを除去している。

一次処理は、第一沈殿池（最初沈殿池）という池で行われる。ここでは比重の大きい浮遊物質（SS：suspended solid, 単位：mg/L）を除去している。一次処理の目的は、続く二次処理（生物処理）の準備であり薬品を加えて汚濁物を塊にせず、池内を低速で流す（2～3時間）ことで除去させている。

二次処理の反応槽で行われる生物処理は活性汚泥法である。活性汚泥法とは、好気性細菌を一次処理水に加えて有機物を分解していく方法である。好気性細菌は有機物を利用して繁殖し、凝集性のあるゼラチン状のフロック（塊）を作り、このフロックは活性汚泥と呼ばれる。フロックは沈殿し易くなっており、底に溜まったフロックが除去される。しかし、フロックの中では細菌がまだ生きており、次に流入してきた下水に混合されて再利用されている。

反応槽で生じた活性汚泥を沈殿させる池を第二沈殿池（最終沈殿池）という。第二沈殿池では活性汚泥を3～4時間掛けて沈殿させ、上澄みの処理水を流している。ここまでの処理で生物化学的酸素要求量(BOD: biochemical oxygen demand, 単位：mg/L)やSSは大よそ90～95%除去することができる。しかし、処理された水であるが、水質は富栄養化状態となっており光合成生物が繁茂する環境として最適であり、三角堰や壁面のコンクリートに付着した光合成生物を除去するための清掃コストや剥がれ落ちた光合成生物が高度処理過程で腐敗し、処理に影響を及ぼすことが知られている。

高度処理では、処理水の更なる清涼化のために様々な処理を行う。新河岸水再生センターでは、砂ろ過法、生物膜ろ過法やA₂O法(嫌気・無酸素・好気法)が用いられている。砂ろ過法、生物膜ろ過法は、第二沈殿池で除去できなかった小さな汚泥を取り除く方法である。A₂O法は富栄養化の原因となる窒素やリンを除去する方法である。反応槽のタンクを嫌気槽・無酸素槽・好気槽に分け、それぞれの槽内で生物処理を行っている。



Fig. 1.1 Second sedimentation basin

1-2. 一般的な付着生物の問題及びその対策

一般社会における生物の付着は広く問題となっており，多大なる経済損失を生む要因となっている．例として，船舶への海洋生物の付着によって船体摩擦抵抗の増加による燃費の増大，スピードの低下，過度な負荷による推進器の劣化促進などの損害が挙げられる^[2]．また，発電所の排水溝への海洋生物の付着により，それらの清掃処理に多大な労力と費用を要しているなどの損害も挙げられる^{[3][4]}．これらの対策として防汚塗料を使用し生物付着を抑制する方法が多く取られているが，効果持続性，コスト，環境汚染などの問題を持っており，様々な研究が行われている^[5]．

また，1-1 でも述べたように下水関連施設においても光合成生物の付着による景観障害や下水処理への障害といった問題も生じている．下水関連施設において光合成生物の発生・付着は，下水処理場で処理される水に窒素やリン等の栄養塩類を高濃度を含み，屋外設置のため日照も十分に存在するためである．光合成生物にとって窒素とリンは植物生育の必須要素で，更に十分な日光がある場合，光合成が促進されて光合成生物の大繁殖が起り，下水関連施設以外にも一般的に赤潮やアオコを引き起こす．このような光合成生物の発生対策として，窒素やリン等の栄養塩類を除去する方法や，遮光による方法などが一般的であるが，光触媒作用による有機物の分解作用により光合成生物を抑制方法^[6]といった様々な研究も行われている^{[7][8]}．

1-3. 本研究の目的

付着生物の成長抑制に関しての化学的、物理的、機械的といった様々な方法があるが、下水処理工程内である第二沈殿地の三角堰に付着する光合成生物を抑制する方法に焦点を当てた研究は数少なく、物理的な除去方法を研究するものは見受けられない。さらに、第二沈殿地のような下水処理施設での付着抑制方法は処理に影響を与えないといった制約もあるため抑制方法には工夫が必要となる。本研究では、第二沈殿地の三角堰に付着した光合成生物の付着原因を調査した後、表面処理効果、ひさしの設置や三角堰越流部分に曲げ加工を施すといった方法により光合成生物の付着抑制を行った。また数値解析により通常の三角堰と曲げ部を持つ三角堰の越流前後における流体の流れ変化を調査することで、曲げ部を持つ三角堰による付着抑制への効果を示した。よって本研究では、光合成生物の付着原因を調査し付着抑制実験において抑制効果を示し、堰表面への光合成生物の付着を抑制することを目的としている。

・第2章 調査

本研究を進めるにあたり、第二沈殿池内の三角堰に付着する光合成生物の問題を調査した、第二沈殿池とは1章で述べたように、污水处理工程において生じる塊となった汚泥を、流れを静止させたプールで沈殿させ上澄みを三角堰により流す場所である、新河岸水再生センター(2013年9月19日)及び芝浦水再生センター(2013年10月24日)で調査を行った、

新河岸水再生センターでの第二沈殿池の三角堰表面には、Fig. 2.1 のように光合成生物が付着している状態であった、調査した夏場の時期での光合成生物の付着頻度は多く、約1週間でFig.2.2のような光合成生物の付着が見られる、光合成生物の付着形状が特徴的であり、堰表面の全体に渡り付着するのではなくハの字型(赤線)のように付着している、さらに三角堰の中央部分には付着が見られなかった、Fig. 2.3, Fig. 2.10は日が直接当たらない位置における三角堰であり、ほとんど付着が見られず、Fig. 2.2と比較すると日の当たる位置によって光合成生物の付着具合に大きな差があることがわかる、さらには、三角堰表面の色が変化している部分は越流水が堰を沿うように流れた跡であると推察される、Fig. 2.4, Fig.2.5のように第二沈殿池内を浮遊している光合成生物も見られ、これらが第二沈殿池から流れ出し第二沈殿池以降での処理過程に影響を及ぼしている、また、第二沈殿池内に浮遊している光合成生物を採取し同定した結果をFig. 2.6, Fig. 2.7に示している、これらは、珪藻、緑藻や藍色細菌などといった富栄養化な水に発生する一般的な光合成生物であることがわかり、その中でも珪藻が優占していた、

芝浦水再生センターでの第二沈殿池の三角堰(Fig. 2.8)は、調査日の前日に清掃が行われており、三角堰に付着した光合成生物は見られなかったが、Fig. 2.9のように三角堰表面にはハの字型に変色した部分が見受けられる、これは、新河岸水再生センターでの三角堰に付着した光合成生物の形状および日が直接当たらない位置における三角堰の越流水が堰を沿うように流れた跡と似ていることがわかった、

これらの調査結果を踏まえて、第二沈殿池の三角堰に付着する光合成生物の付着原因および抑制方法を研究している、

I. 新河岸水再生センター



Fig. 2.1 Second sedimentation basin

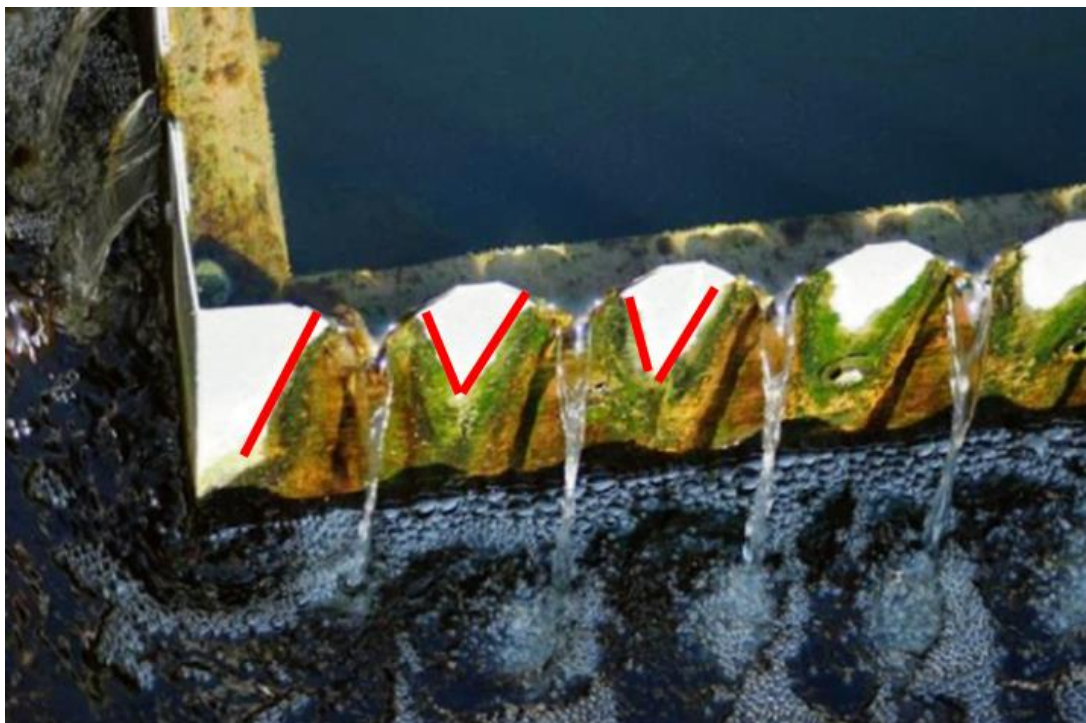


Fig. 2.2 Photosynthetic organisms which attached to the triangle weir of the second sedimentation basin



Fig. 2.3 Triangular weir facing the north direction



Fig. 2.4 Photosynthetic organisms floating in the second sedimentation basin (①)

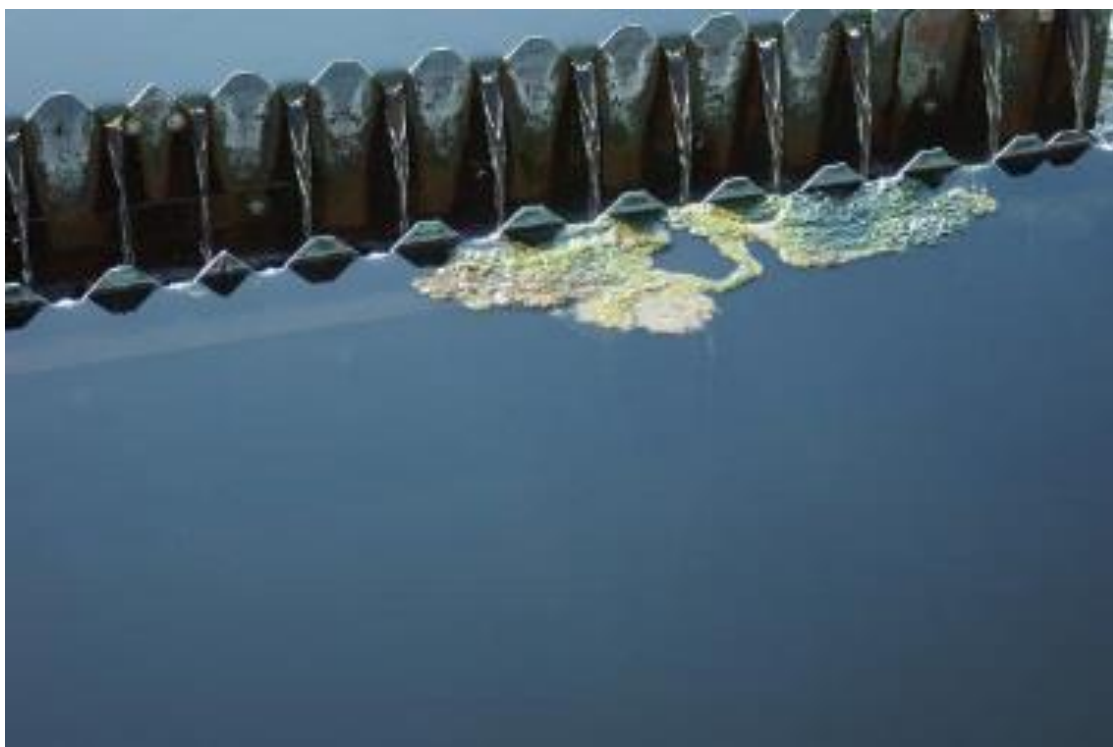


Fig. 2.5 Photosynthetic organisms floating in the second sedimentation basin (②)



Fig. 2.6 Diatom (second sedimentation basin)

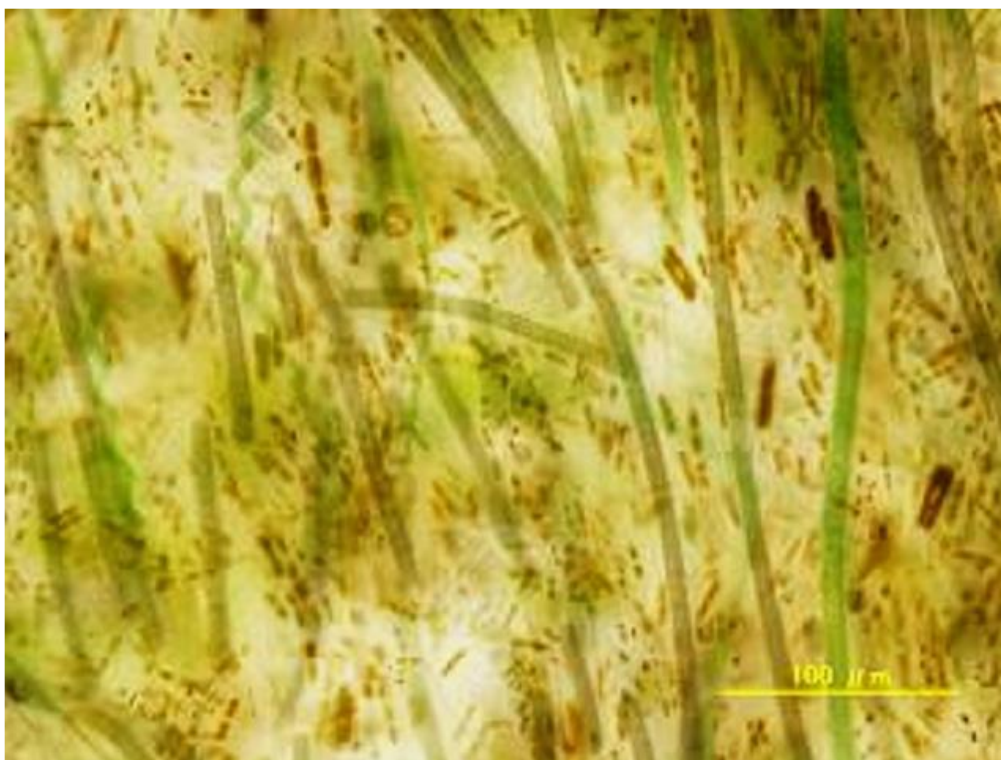


Fig. 2.7 cyanobacteria (second sedimentation basin)

Ⅱ. 芝浦水再生センター



Fig. 2.8 Second sedimentation basin

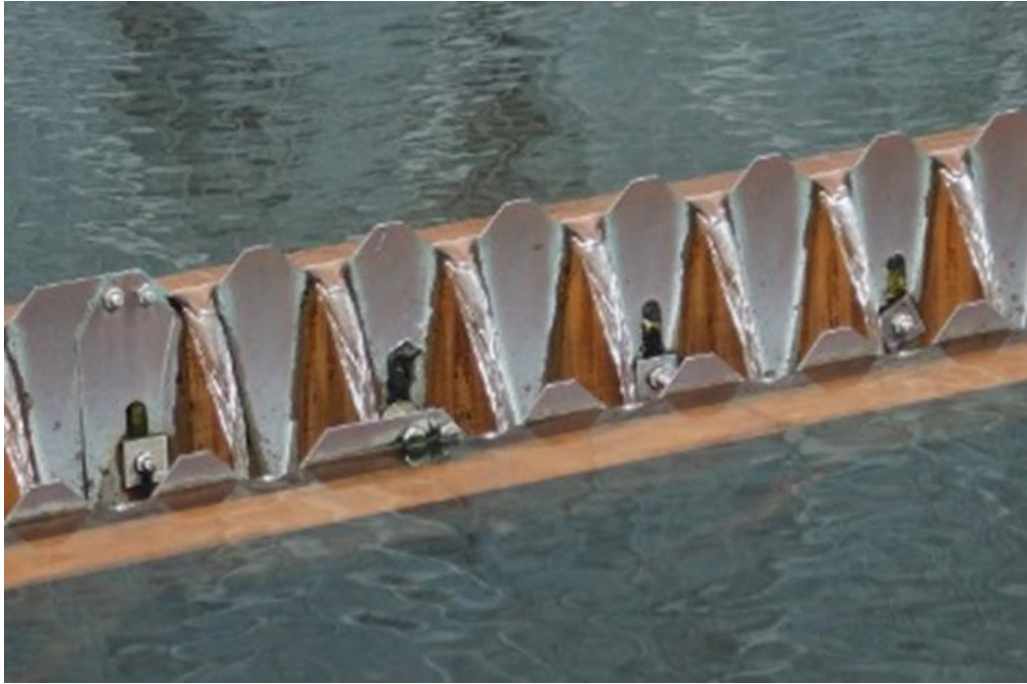


Fig. 2.9 Triangular weir of second sedimentation basin that has been cleaned



Fig. 2.10

・第3章 実験装置及び実験方法

3-1. 三角堰水槽

Fig. 3.1 に装置全体図, Fig. 3.2 に装置概略図を示す. 大小の水槽とポンプを用いて, 第二沈殿池の環境を再現できる装置を試作した. 大きな水槽内に三角堰を取り付けた小さな水槽を設置して水を循環させた. 内側の水槽内には冬期に使用するヒーター, 夏期はチラーを設置して水温 (22℃) を維持した.

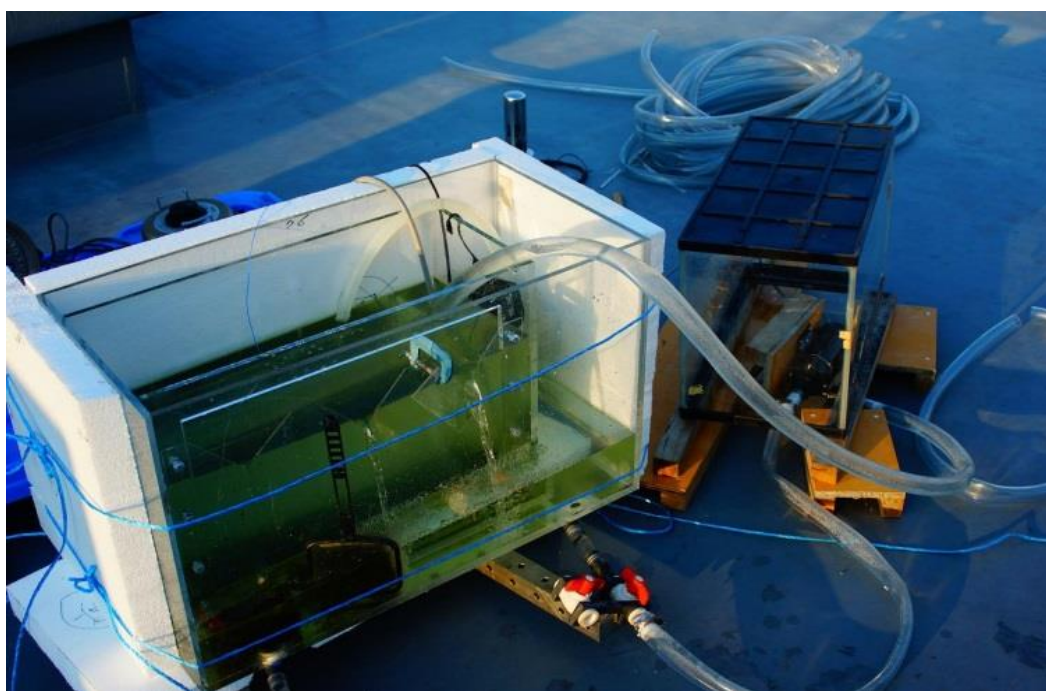


Fig. 3.1 Experiment device

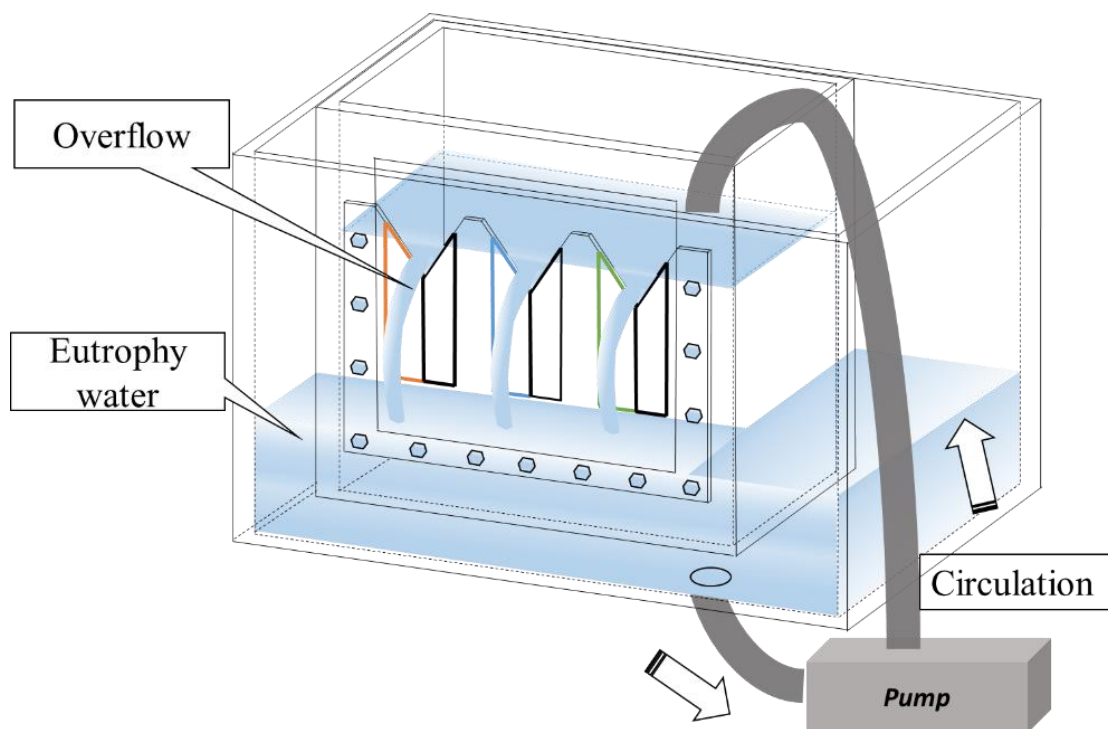


Fig. 3.2 Experiment device

3-2. 実験条件

光合成生物が繁殖するような環境を想定して、以下のような実験条件で実験を行った.

水質：大学内の池の水を使用（実験開始時）

水の入れ替え：1日毎に水槽内の水 1000mL を池の水 500ml と水道水 500ml と入れ替え

栄養添加:水草用の栄養剤(AQUA DESUGN AMANO be ブライト)を毎日添加 5ml (添加できない日は, 後日に添加できなかった日の分まで追加)

【栄養成分：窒素, リン, カリウム等】

種藻：大学内の池の岩場に付着した光合成生物を採取+水草（第二沈殿池で採取した光合成生物の同定結果より, 一般的な光合成生物であったため池の岩場で採取した光合成生物を添加した. 水草は市販の「ウイローモス」「マツモ」を添加)

水量維持：外側水槽の水位（三角堰の越流部分から水面までの距離）が一定値（15.5cm）になるように調整

水温維持：冬期は水槽内にヒーターを設置, 夏期はチラーを設置【22℃に設定】し, 冬期は水槽の周囲を発泡スチロールで覆った. 実験装置の構造上, 雨水の混入で実験条件が変化する可能性があり, 雨よけの蓋を水槽にかぶせた

水温・湿度・照度測定：実験装置にセンサーを取り付けロガーにより常時計測した.

3-3. 三角堰への光合成生物の付着実験

第二沈殿地の三角堰における光合成生物の付着・成長の要因は様々あり、主に、堰表面の水分・堰表面の状態・流れの影響・光や温度であると考えている。しかし、この中でどの要因が大きく影響するのかは、分からず全ての可能性を否定できない。

そこで本実験では、3 項目の実験を行った。初めに、三角堰表面をぬらす条件を作り三角堰表面の水分と付着の関係を調べた。次に、三角堰からの越流流量の変化がもたらす三角堰表面のぬれについて、回流水槽内に模擬的な三角堰を設置し堰表面の流れの様子を観察した。次に、太陽光と付着の関係を調べるため、越流水脈が作る影による三角堰表面の照度分布の変化を測定し光合成生物と付着の関係性を考察した。

3-3-1. 三角堰表面の水分と付着の関係

越流による三角堰表面のぬれが光合成生物の付着に与える影響を調べた。

各三角堰を Table. 3.1 ように設定し、Fig. 3.3 のように 1 から 6 の名前を付けて設置し三角堰表面の水分と付着の関係を調べた。各三角堰を写真撮影(SONY α 65. 以下、写真撮影において同様のカメラを使用した。)によって比較し、三角堰表面のぬれと光合成生物の付着具合を時系列で評価するため数日毎に撮影を行った。Fig. 3.4 に写真撮影範囲、Fig. 3.5 に屋外での撮影方法について示す。

また、三角堰からの越流流量の増減による三角堰表面へのぬれ具合の変化を調べた。本実験では、回流水槽内で壁面を白色に着色した板を設置し、その上から三角堰 (Fig. 3.6) を設置、さらに黒色に着色した水を流すことで、堰表面を流れる水の挙動を観察した。また回流水槽内の流量を増減させ堰表面を流れる水の挙動を観察した。三角堰からの越流挙動の観察は写真撮影により比較検討した (Fig. 3.7)。

Table. 3.1

堰番号	設定
1	越流水が外側水槽内に溜まった水に落ちたときの飛沫が堰表面に付着しやすくした
2	1と同様だが、堰の亚克力表面をやすりで粗面とした
3	三角堰エッジに凹凸を施し、越流水が堰表面をエッジから染み出る様に覆った
4	3と同様
5	越流流量を減少させかつ越流水が染み出すように堰表面を親水性コーティング (TOTO ガラスコーティング剤) した
6	5と同様

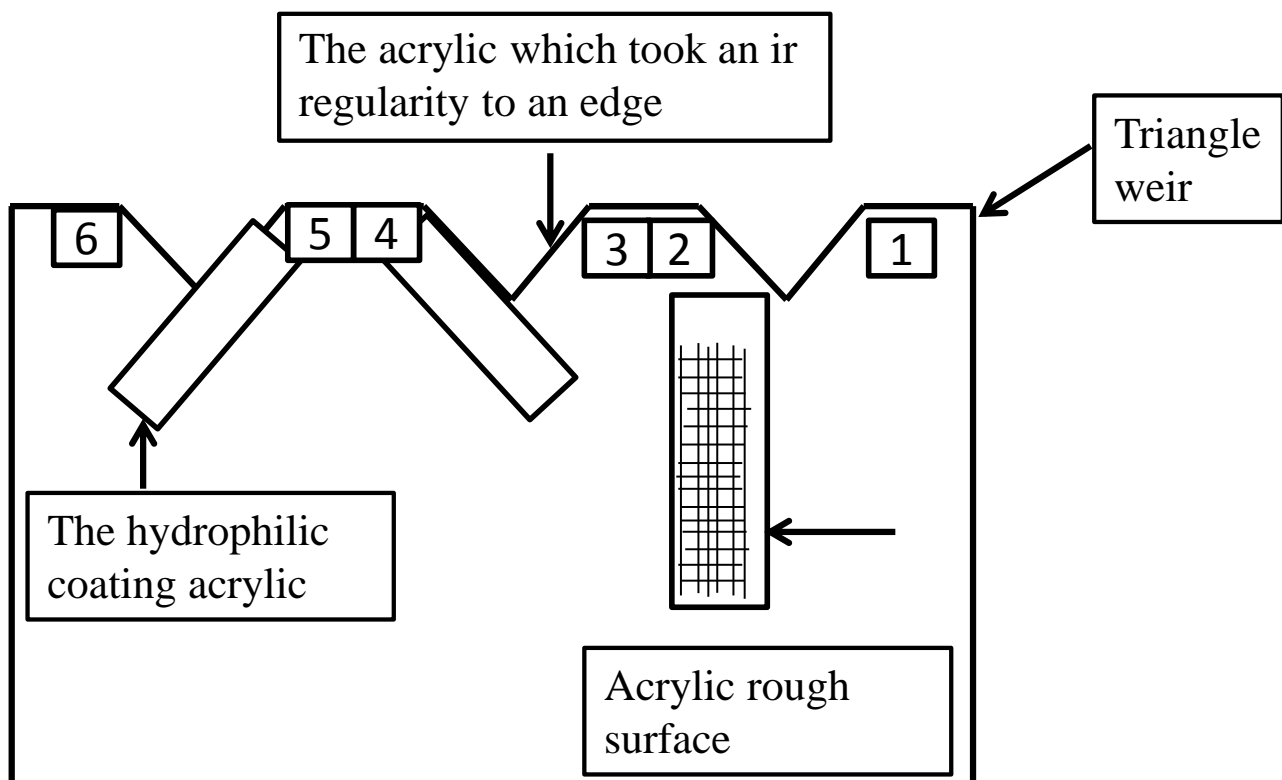


Fig. 3.3 Each weir setting of the triangle weir

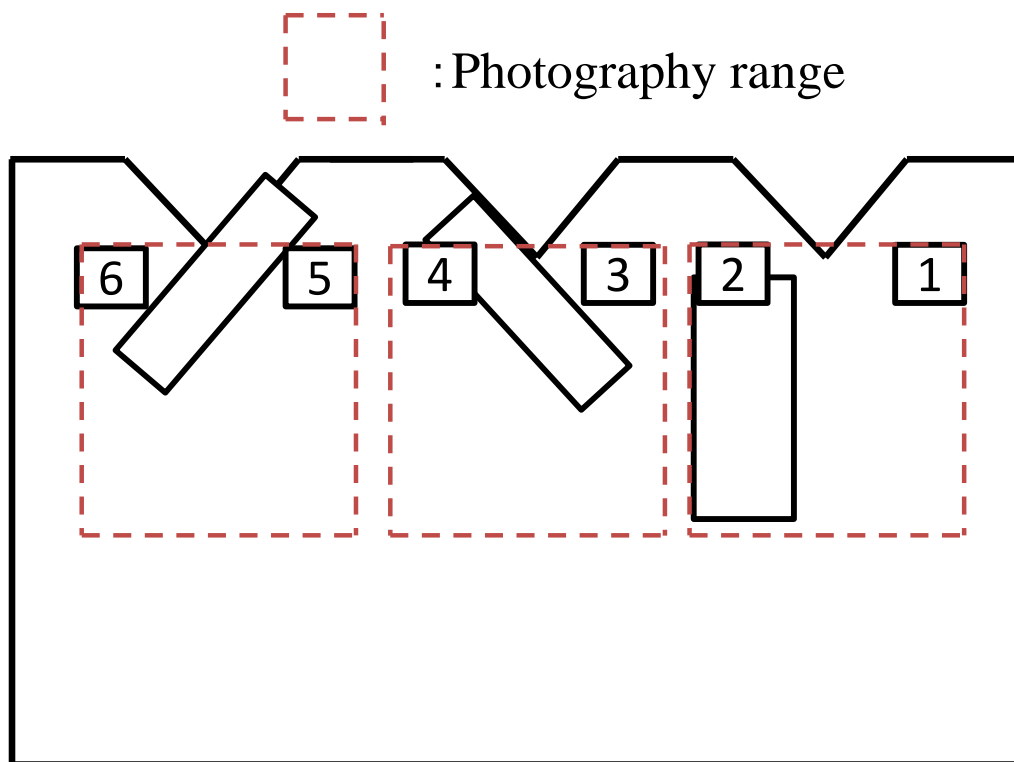


Fig. 3.4 Photography range

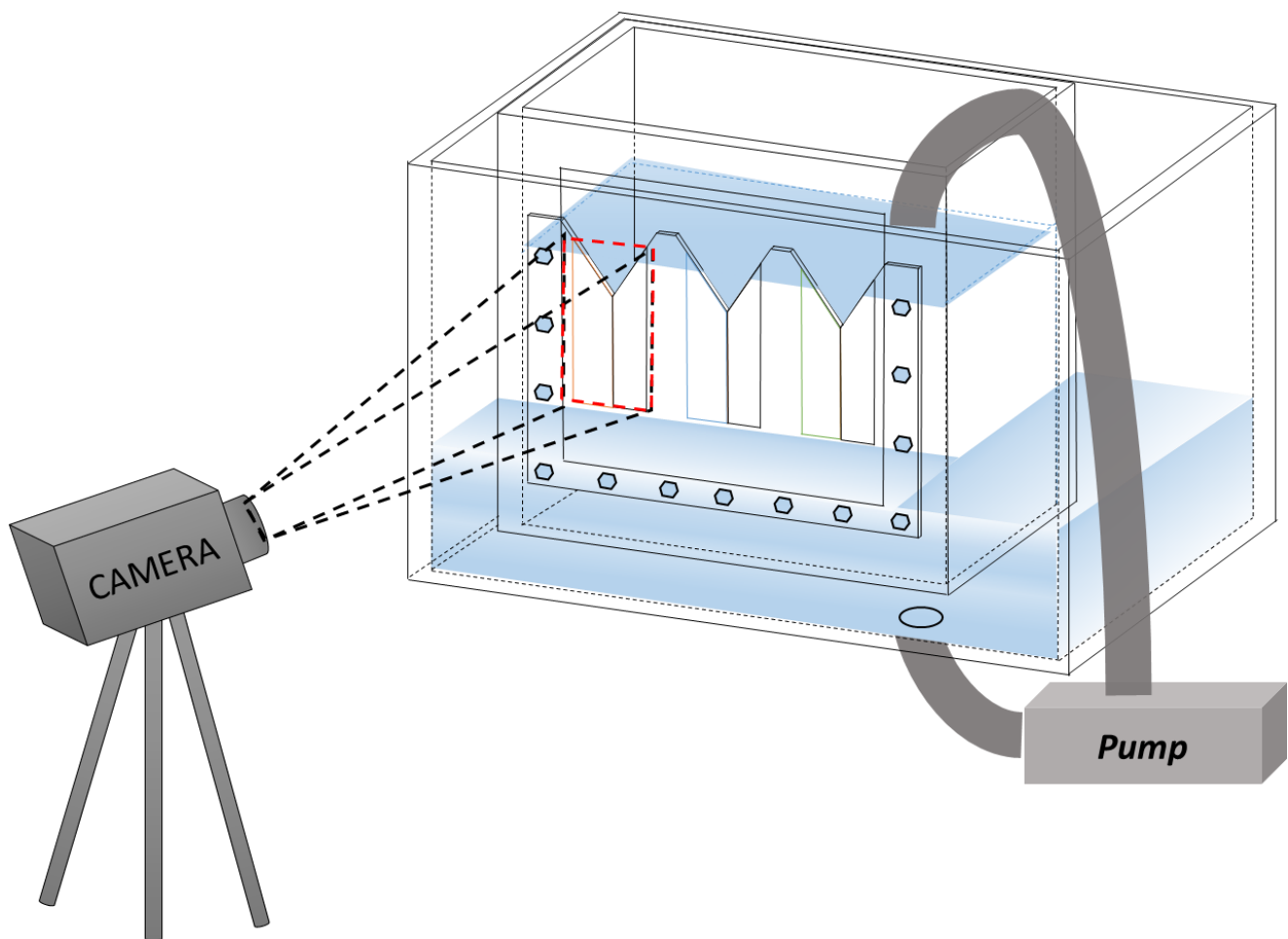


Fig. 3.5 Photography method in the outdoors

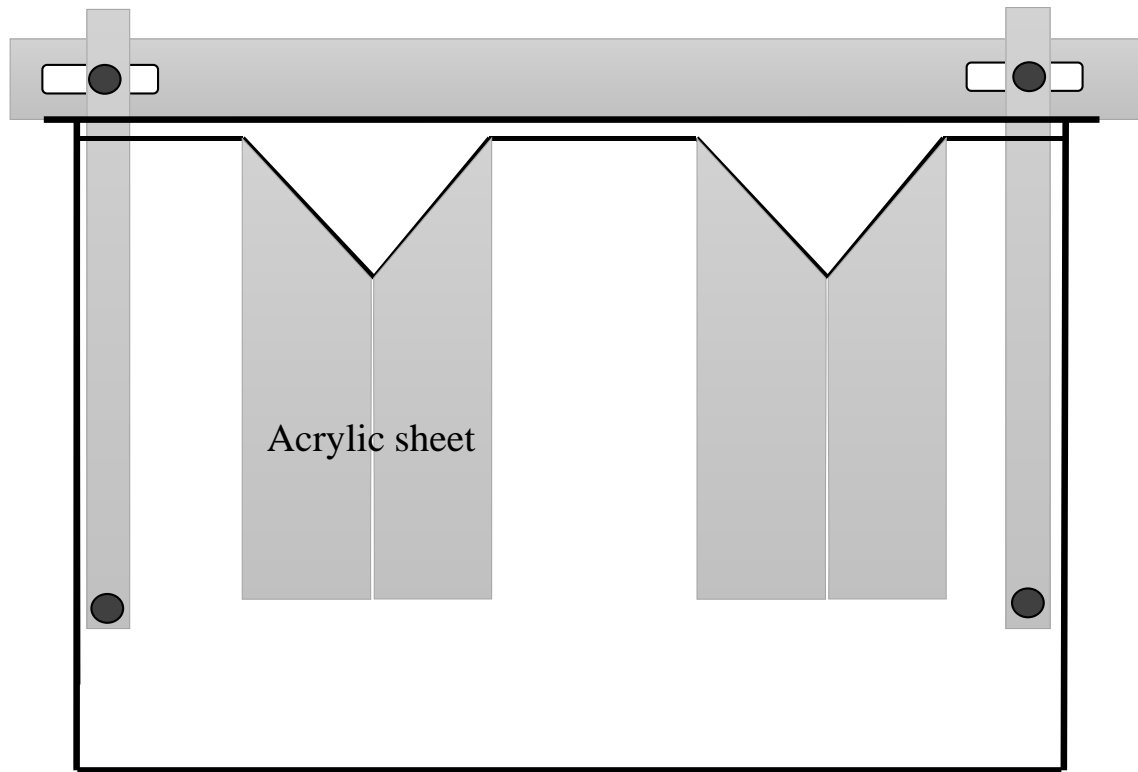


Fig. 3.6 Installation of triangular weir in the circulating water channel

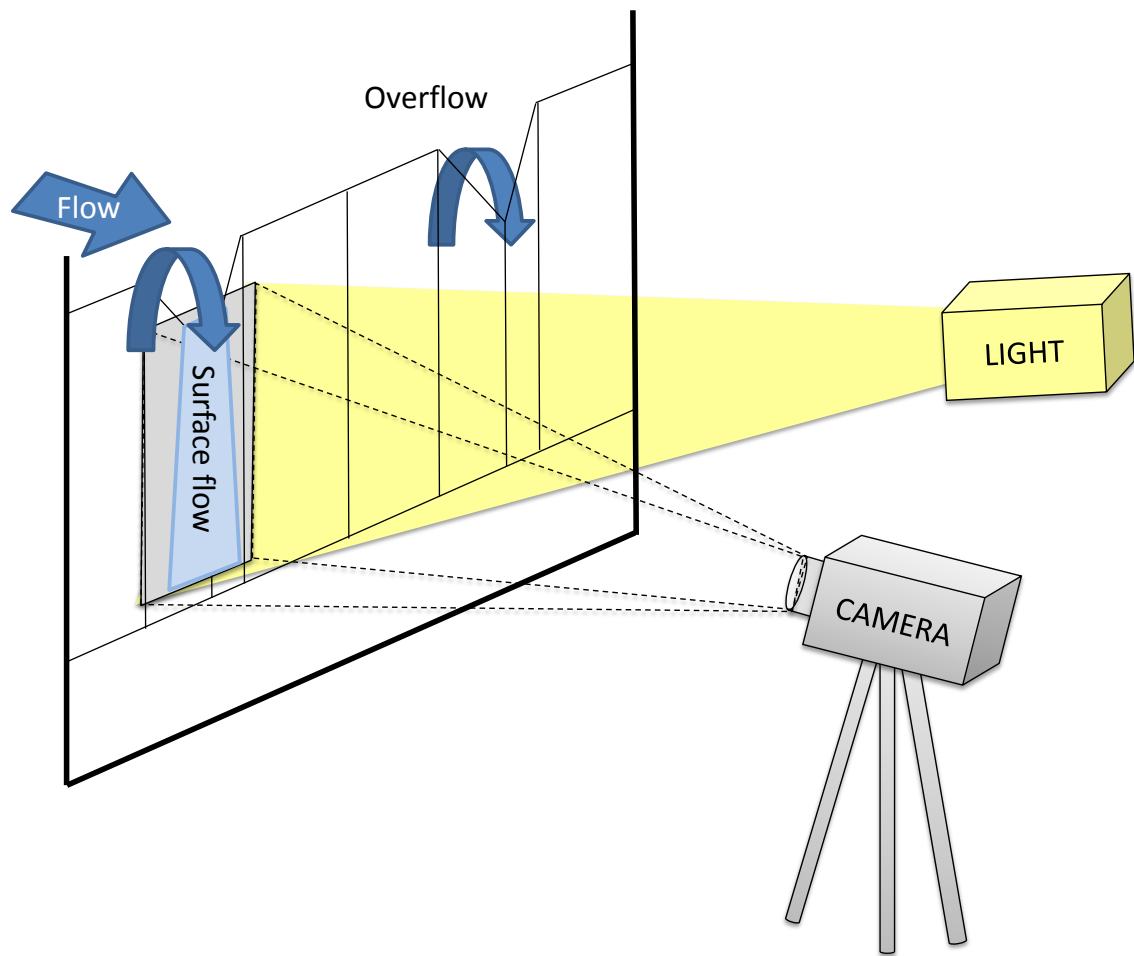


Fig. 3.7 Photographing triangular weir in the circulating water channel

3-3-2. 三角堰表面の照度分布と付着

本実験では，三角堰からの越流水脈が作る影による三角堰表面の照度分布の変化を調べ，光合成生物の付着との関係を調べた．三角堰下部に照度センサーを設置し(Fig. 3.8)，時間変化による三角堰表面の照度分布を測定し，付着との関係性を考察した．

また，各照度センサーの取り付け方や感度が均一ではないため，照度センサーの補正を行った．校正は任意の時間における 16 個のセンサーの平均値を真の値と見なし，各センサーがその平均値に近づく様に補正係数を決め，補正した．

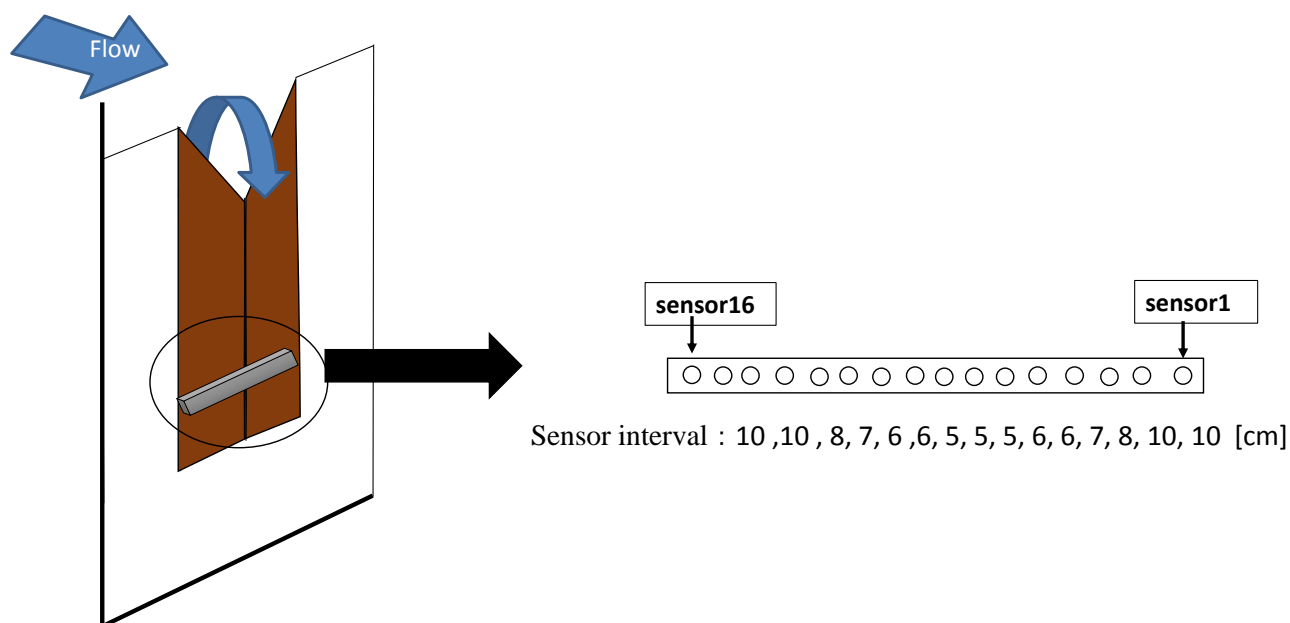


Fig. 3.8 Installation of illumination sensor

3-4. 三角堰への光合成生物の付着抑制実験

三角堰表面への光合成生物の付着を抑制するため、三角堰表面性状が光合成生物の付着に与える影響を調べた。また、三角堰越流部分へのひさしの設置や三角堰越流部分に曲げ加工を施した三角堰による抑制実験を行った。表面処理による生物の付着抑制は下水関連施設以外においては一般的であるが、第二沈殿池における実用例はないためその効果を調べた。その他二つ抑制方法は、三角堰表面への水分を抑制することで、光合成生物の繁殖を抑制する方法の一つとして実験を行った。これらの付着抑制方法は写真撮影により比較した。写真撮影は取り外し可能な三角堰を実験装置から取り外し、撮影時の明るさを一定条件に保つために暗室で行った。

3-4-1. 表面処理による付着抑制

三角堰表面性状が光合成生物の付着に与える影響を調べた。三角堰を Fig. 3.9 のように設定し、各三角堰は Fig. 3.10 のような形状に加工し取り付けた。表面処理による付着抑制は防汚用撥水处理剤(Fluorotech, FG-5080SH-0.1)、超撥水(ポニー工業 ULTRA-EVER DRY)、防汚塗料(中国塗料, バイオクリン)の3つで実験を行った。それぞれの表面処理の効果を以下に示す。2種類の撥水处理においては、効果の違いを調べるためそれぞれの接触角を調べた(Fig. 3.11, Fig. 3.12)。また防汚塗料の原理としては、表面張力の低いシリコーン系合成樹脂を複数の特殊な表面調整剤で変性し、これを塗膜要素とすることにより表面構造が親水-疎水のミクロ相分離構造となっている。バイオクリン塗料は抗血栓材料の性質に類似しており、異物拒絶反応によって始まる接着性セメントの固化が抑制され、生物は十分な付着ができない。

各堰について、堰番号2は防汚用撥水处理剤(Fluorotech, FG-5080SH-0.1)、堰番号4は沈澱池の三角堰に用いられている銅板を使用した。堰番号6には防汚塗料(中国塗料, バイオクリン)を設置した。堰の位置による違いが無いことを確認するため、これら2,4,6の堰の右側に比較用の同一の亚克力板を取り付けた。三角堰表面性状が光合成生物に与える効果は、写真撮影により比較した(Fig. 3.14)。三角堰表面性状による光合成生物の付着具合を時系列で評価するため数日ごとに撮影を行った。

また表面処理効果が光合成生物の付着に与える影響として長期間に渡る実験結果も評価した。各三角堰は Fig. 3.13 のように設置した。堰番号1は超撥水塗料を塗布し、堰番号4には銅板、堰番号6には防汚塗料(中国塗料, バイオクリン)を塗布した。堰の位置による違いが無いことを確認するため、堰番号1, 3, 5には

比較用の同一の亚克力板を取り付けた．三角堰表面性状が光合成生物に与える効果は，写真撮影により比較した．三角堰表面性状による光合成生物の付着具合を時系列で評価するため数日毎に撮影を行った．

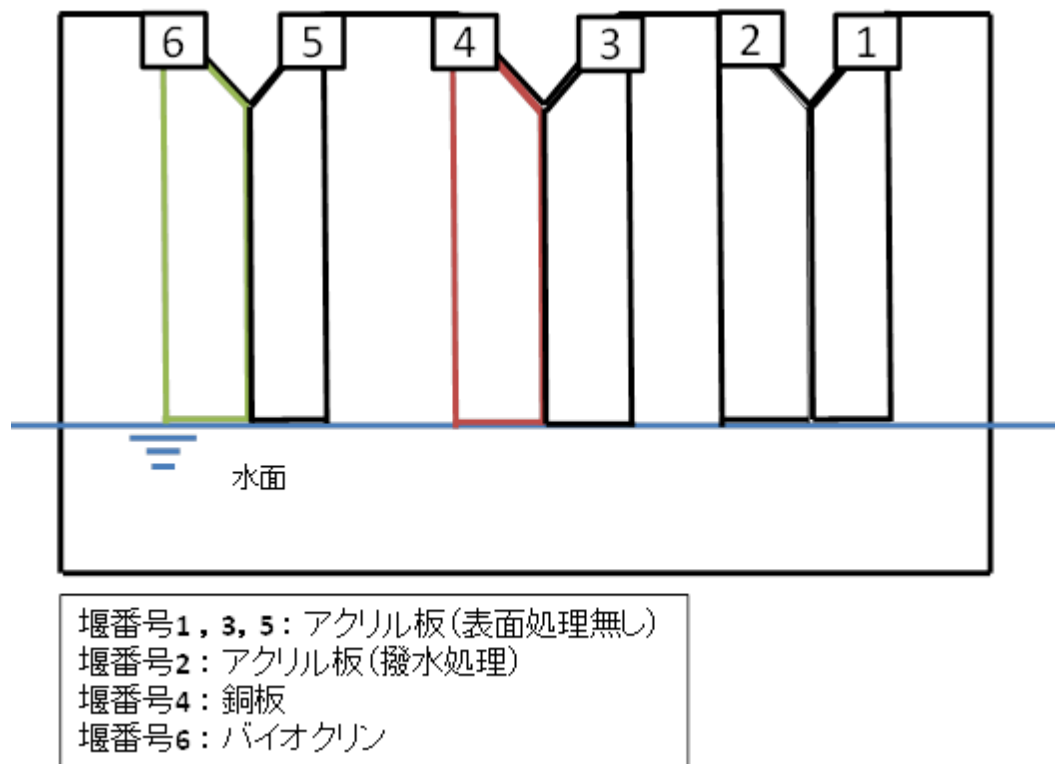


Fig. 3.9 Each weir setting for surface treatment examination

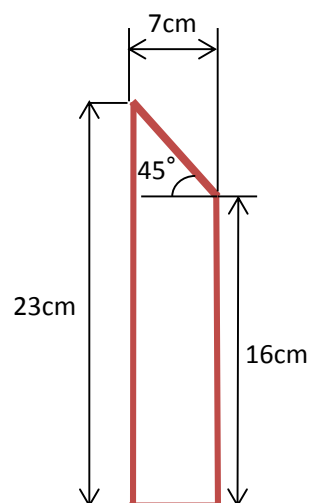


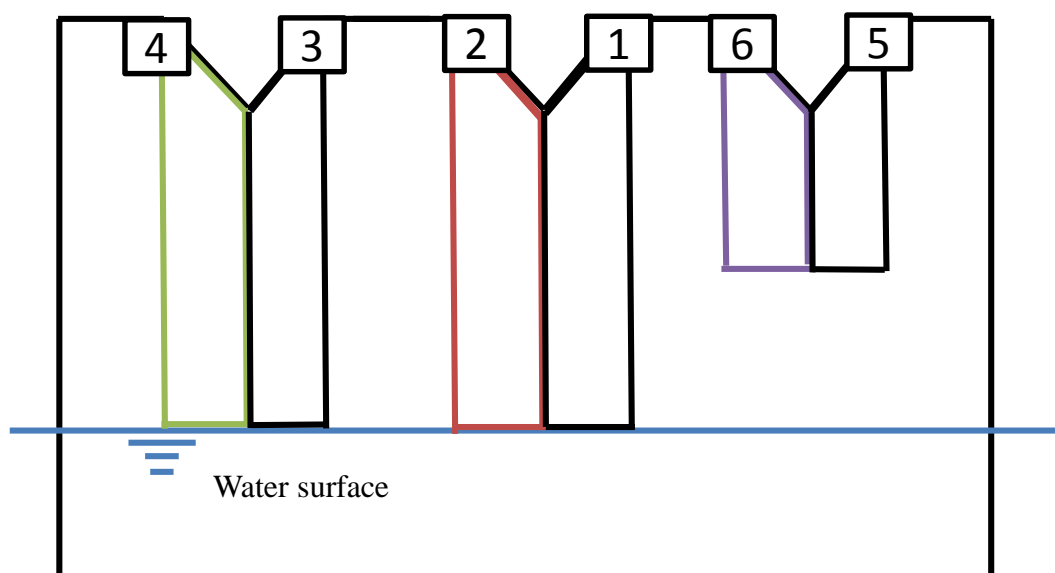
Fig. 3.10 Triangular weir size



Fig. 3.11 Contact angle of the super water-repellent processing 152°



Fig. 3.12 Contact angle of the water-repellent processing 102°



堰番号2, 3, 5 : アクリル板(表面処理無し)
 堰番号1 : アクリル板(超撥水)
 堰番号4 : 銅板
 堰番号6 : 防汚塗料(バイオクリン)

Fig. 3.13 Each weir setting for surface treatment examination

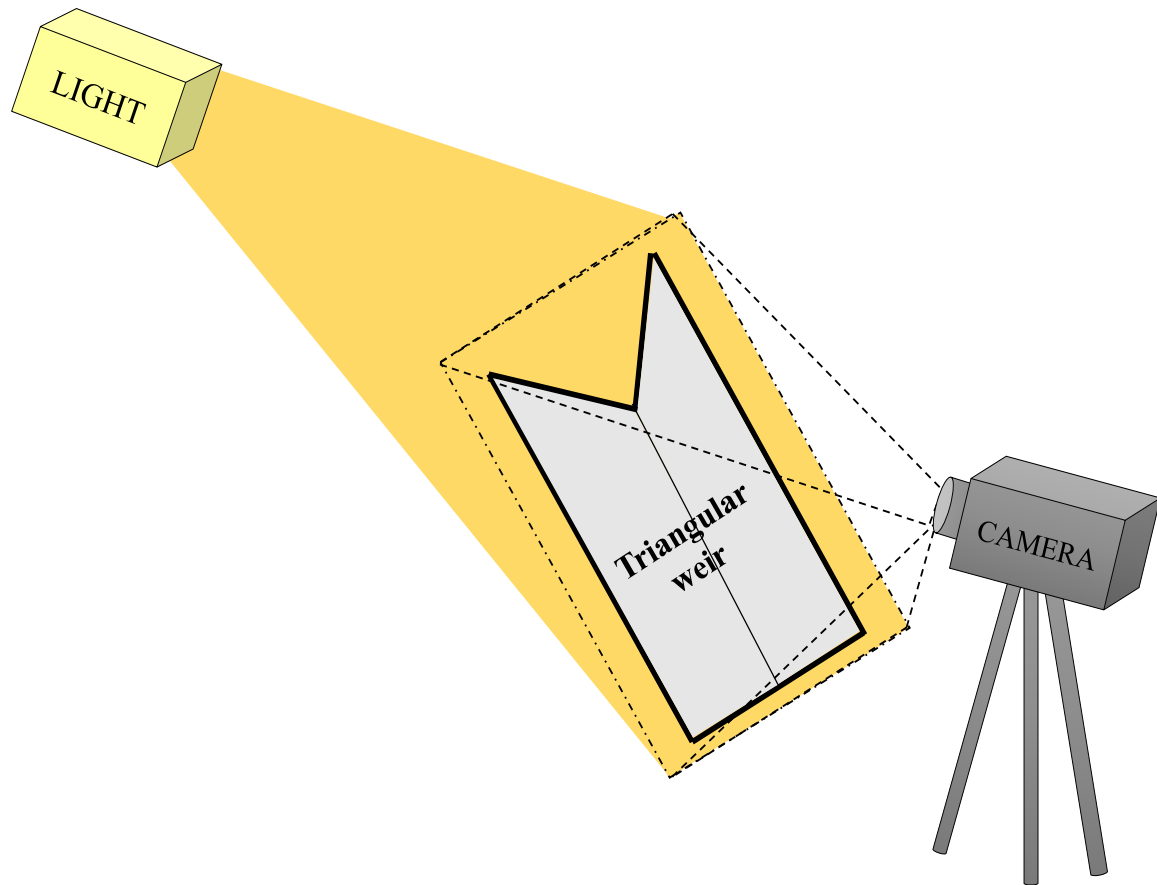


Fig. 3.14 Photography of the triangle weir

3-4-2. 三角堰形状による三角堰表面のぬれ抑制

3-3 で述べたように、三角堰表面への光合成生物の付着は様々な要因があるが、本実験では、三角堰表面のぬれを抑制することで光合成生物の付着を抑制する手法を考えた。

I. ひさしの設置

三角堰からの越流水による堰表面の水分状態が促す光合成生物の付着を抑制する方法として、三角堰にひさしを三角堰の形状に沿うように直角に設置し、堰表面のぬれ具合及び光合成生物の付着具合を調べるため実験を行った。ひさしの設置は Fig. 3.13 の堰番号 1（超撥水）, 2（アクリル）の位置に設置した。ひさしの形状は縦：3cm，横：11cm とし，設置にはエポキシ系接着剤（NICHIBAN アラルダイト）を用いた。Fig. 3.15 に設置イメージを示す。

ぬれ及び光合成生物の付着具合は写真撮影により比較検討した。三角堰表面のぬれ抑制による光合成生物の付着具合を時系列で評価するため数日ごとに Fig. 3.14 のように撮影を行った。

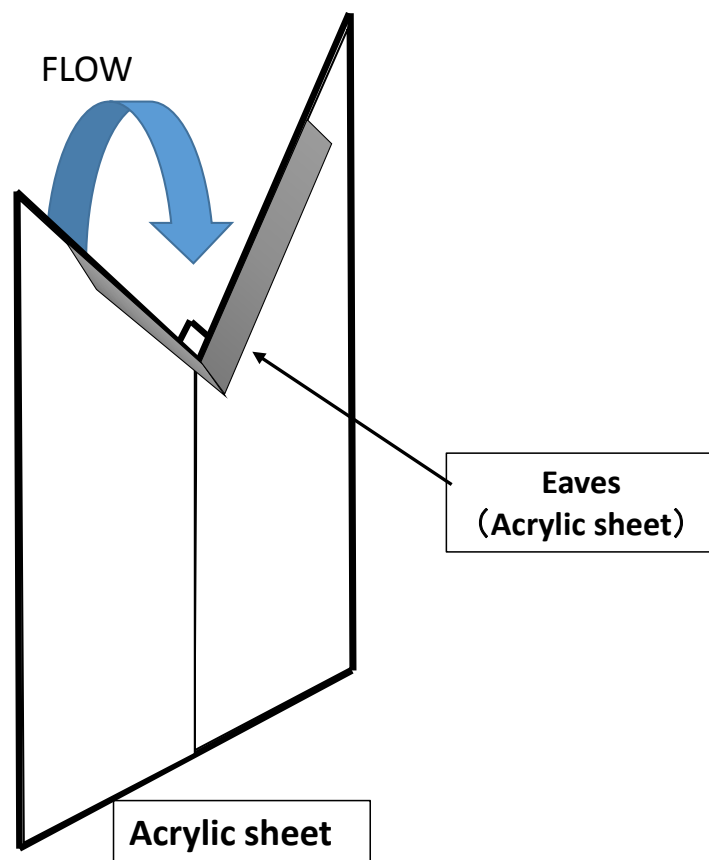


Fig. 3.15 Triangle weir attached the eaves

Ⅱ．曲げ部を持つ三角堰

三角堰から越流した水による堰表面の水分が促す光合成生物の付着を抑制する方法として、三角堰の越流部分に曲げ加工を施し三角堰表面のぬれ具合及び光合成生物の付着具合を調べる実験を行った．実験には曲げ部長さ 0mm, 6.28mm, 9mm の三角堰を用いた．三角堰表面のぬれ抑制による光合成生物の付着具合を時系列で評価するため数日ごとに撮影し比較検討を行った．撮影方法は銅板からの光の反射を抑えるために Fig. 3.16 のように撮影を行った．

三角堰越流部分に曲げ部を持つ三角堰の作製には, Fig. 3.17 のように金型を用いて三角堰を挟みこみ, パンチを当てながらハンマーで叩きながら成形した．また, 三角堰の越流部分形状がサインカーブなるように金型を設計し, ワイヤカット（放電加工）及び手仕上げで作製した．サインカーブ部分の加工においてはワイヤカットのみでは作製できないため, 大よその形状に切断した後, 治具を用いて手仕上げした．治具はサインカーブを 8 等分した点からの引いた接線をワイヤカットで切断し作製した．加工後の曲げ部を持つ三角堰を Fig. 3.18 に示す．三角堰三角堰の越流部分をサインカーブ状に加工することで, 曲率の異なるサインカーブであれば越流時に下流方向に勢いを持つと考えられる．

金型の金型及び三角堰の詳細は, 付録にて図面で示す．

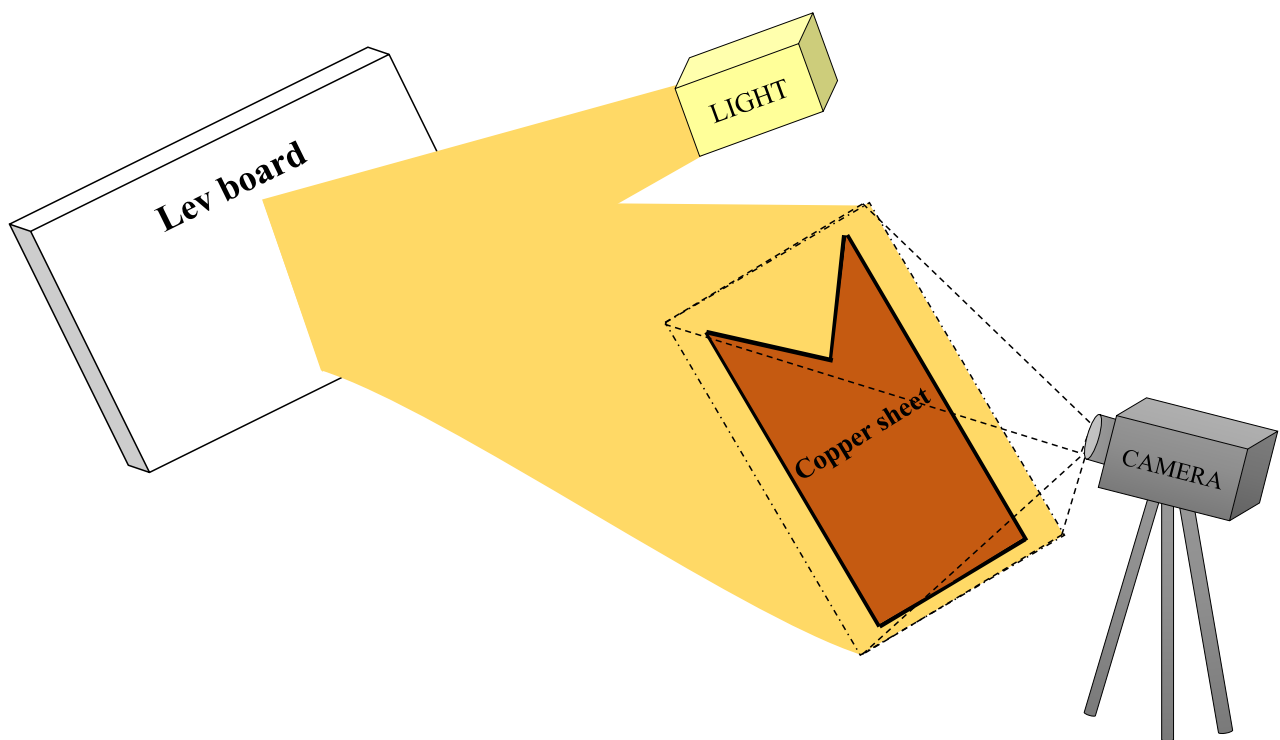


Fig. 3.16 Photographing triangular weir in the darkroom

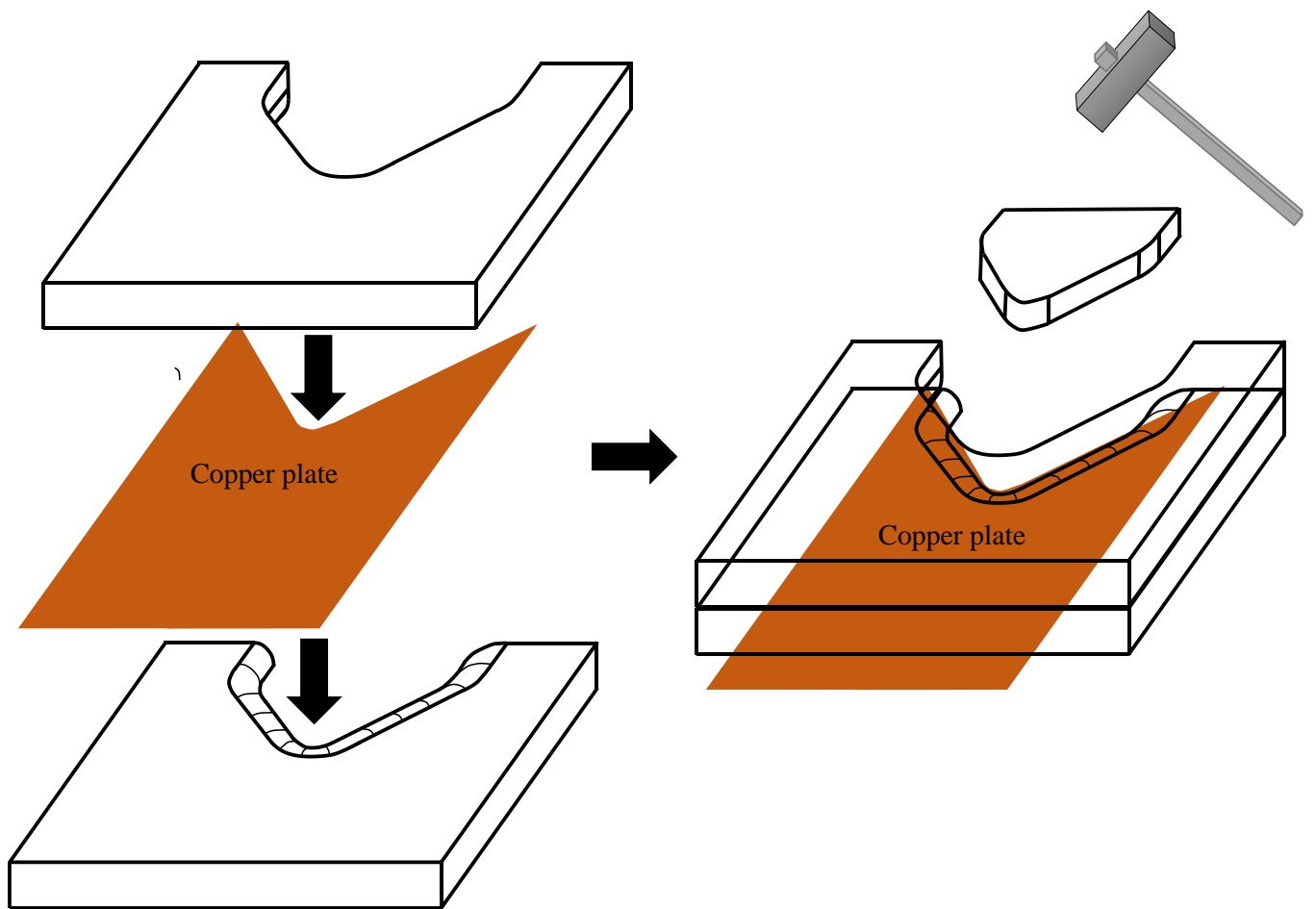


Fig. 3.17 Creating a triangular weir with a bent portion

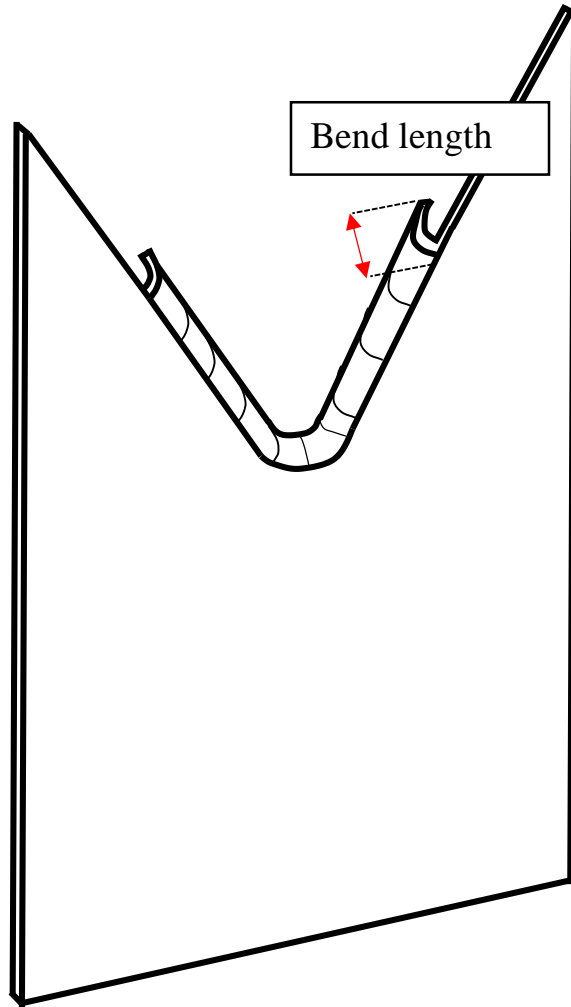


Fig. 3.18 Triangular weir with a bent portion

・第4章 実験結果及び考察

4-1. 三角堰水槽の沈殿地再現特性

2章で述べたように、調査結果を踏まえて、水温や照度などの条件を管理し夏場の第二沈殿池と類似する環境の再現できる試験水槽を試作した。

第二沈殿池に浮遊していた光合成生物(珪藻、緑藻や藍色細菌など)と、実験装置内から採取した光合成生物を顕微鏡での観察、比較したところ、実験装置内の光合成生物は珪藻や藍色細菌であると顕微鏡による観察結果より分かった (Fig. 4.1, Fig. 4.2)。また水槽内全体の状態は、Fig. 4.3のように濃い緑色であり第二沈殿池よりも濃い緑色となっている。内側水槽内の全体には光合成生物が繁茂している状態である。

また、下水処理場に流入される下水と下水処理場から流出する処理水の水温でほとんど変化がなく冬場は約 18℃、夏場は約 28℃^[10]に保たれている。これより、第二沈殿池における水温も大よそ上記の水温の範囲内と推定できる。実験装置内での管理した水温及び湿度の結果を Fig. 4.4～Fig. 4.7 に示す。第1縦軸に水温および照度(相対値)、第2縦軸に湿度、横軸に経過時間を示している。これらの結果より、昼間の水温が上昇する傾向はあるものの、水温は一年を通じて第二沈殿池における水温と同等に管理でき、日照の環境も屋外の環境を再現できたことが示された。湿度に関しては、現場におけるデータはないものの、日中に約 20%低下する傾向があるが、一年を通じて同程度の値を保っている。

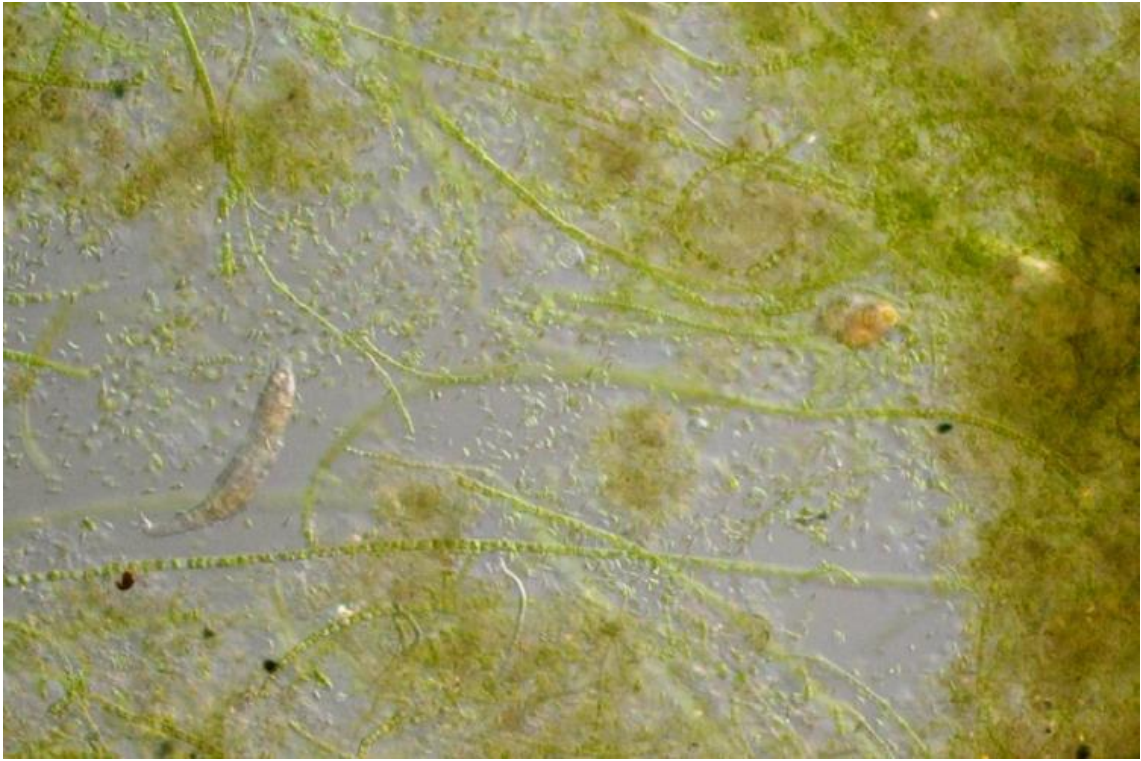


Fig. 4.1 Diatom (experimental device)

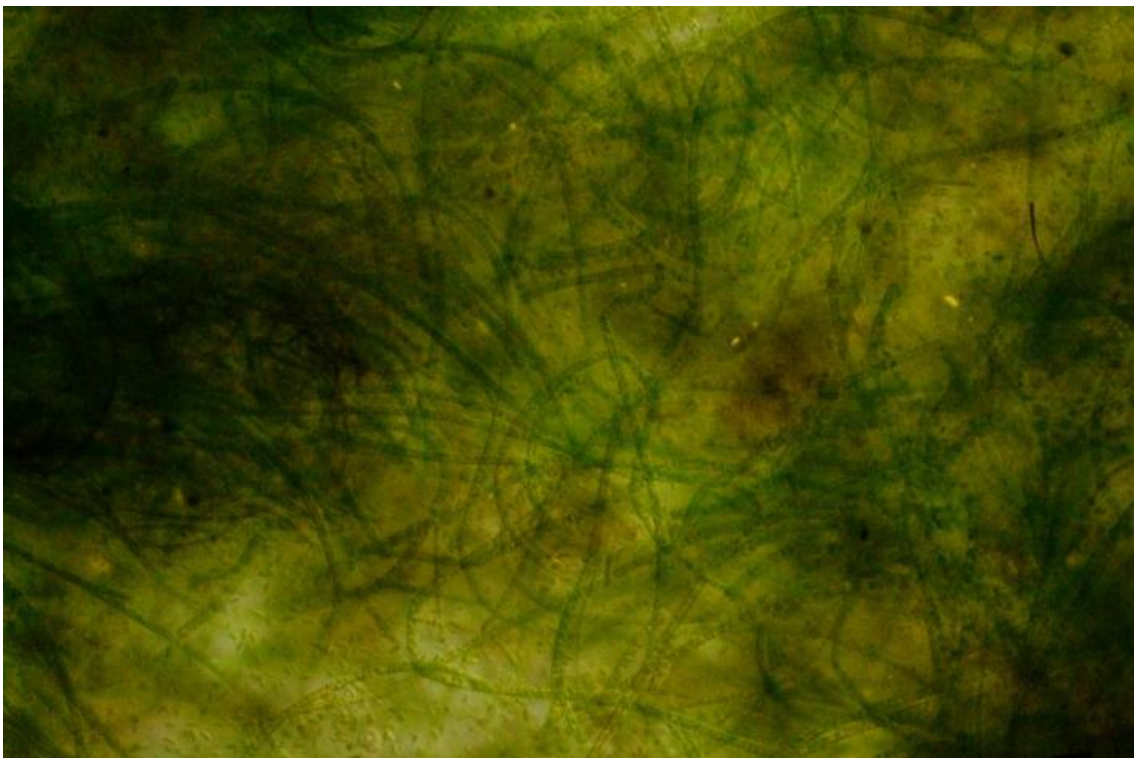


Fig. 4.2 cyanobacteria (experimental device)



Fig. 4.3 State of the photosynthetic organisms of the water tank

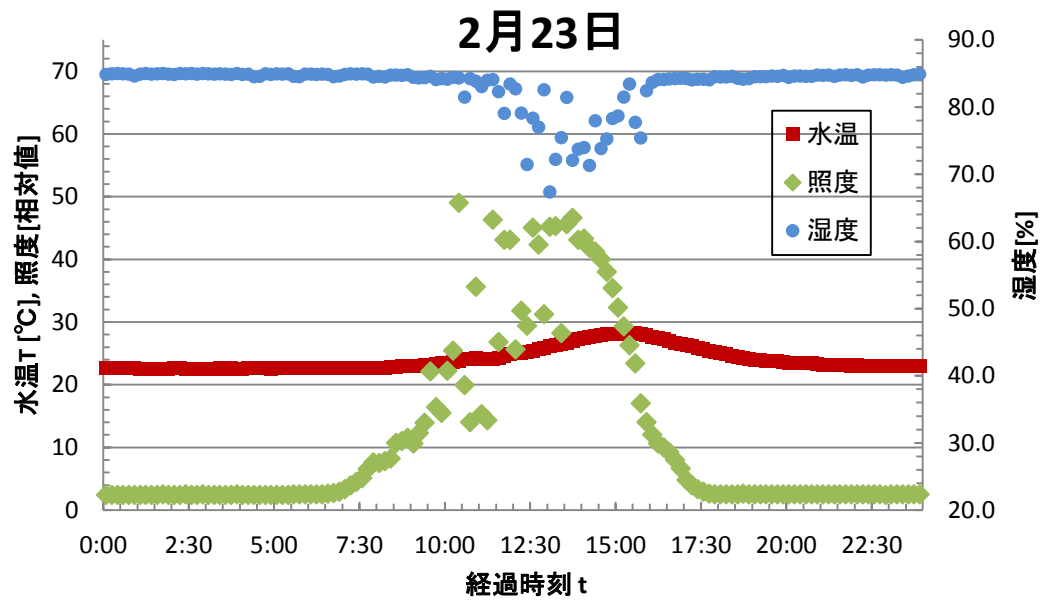


Fig. 4.4 Water temperature, humidity data (2/23)

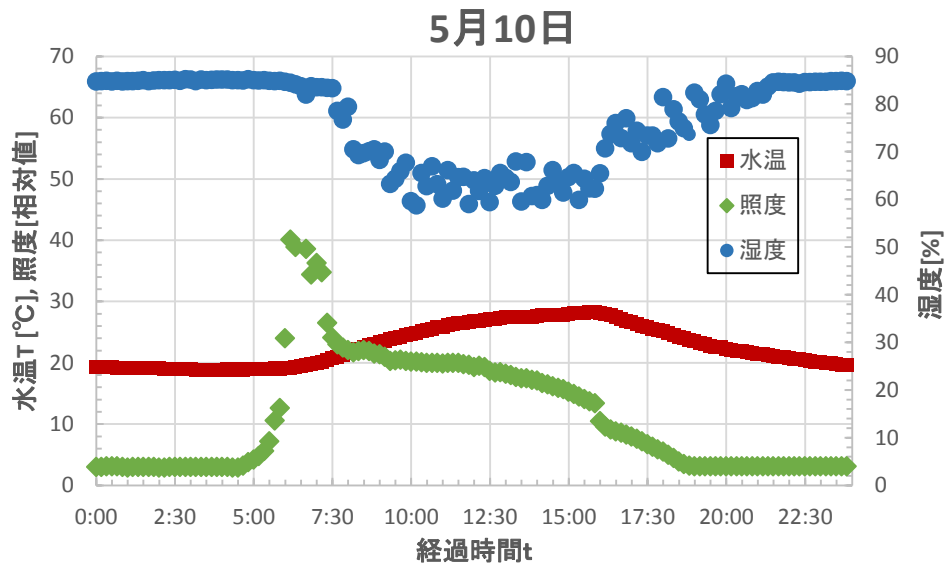


Fig. 4.5 Water temperature, humidity data (5/10)

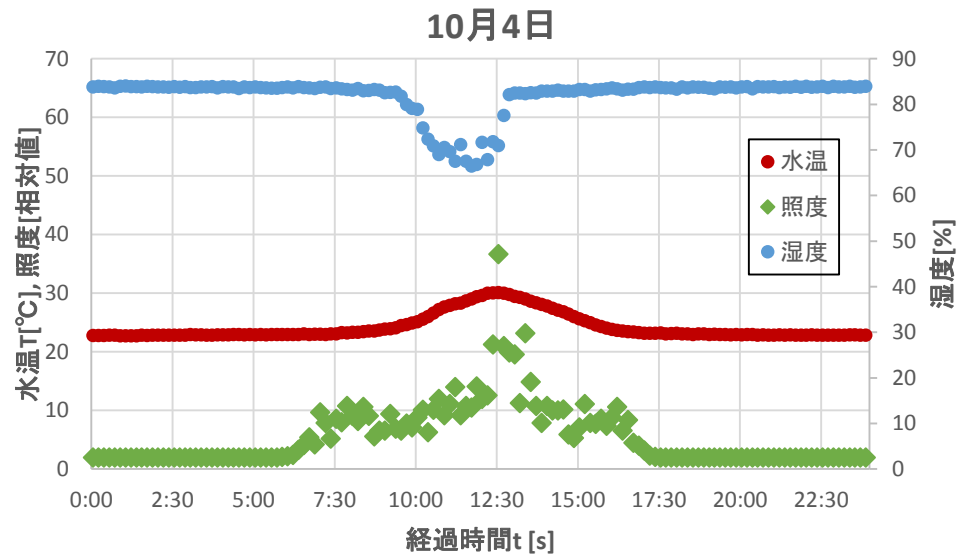


Fig. 4.6 Water temperature, humidity data (10/4)

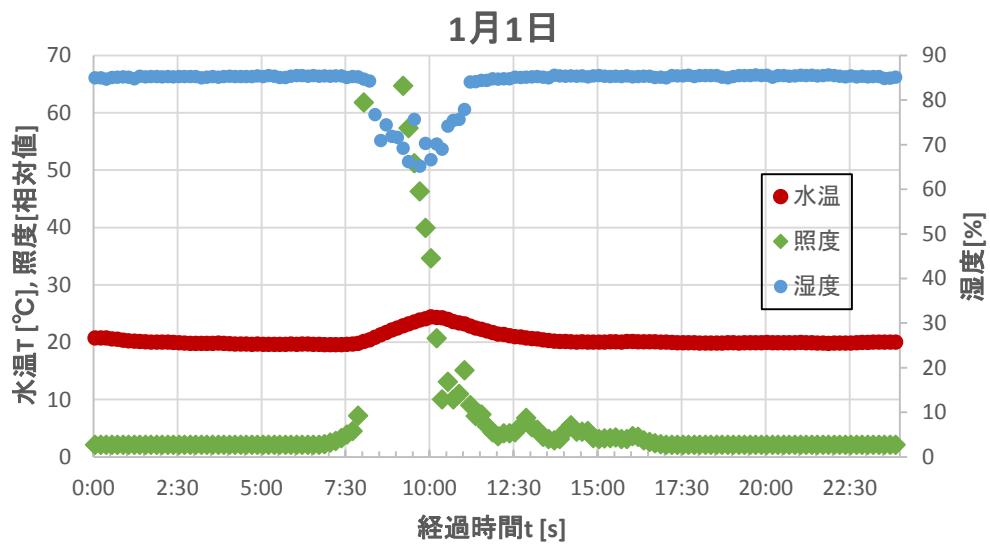


Fig. 4.7 Water temperature, humidity data (1/1)

4-2. 三角堰への光合成生物の付着実験

4-2-1. 三角堰表面のぬれと付着の関係

越流による三角堰表面の水分が光合成生物の付着に与える影響を数日間に渡り写真撮影し、その効果を写真により比較した。1月27日に三角堰の設置を行い(Fig. 4.8~Fig. 4.10), その17日後の2月13日に撮影を行った(Fig. 4.11~Fig. 4.13)。

堰番号 1,2 番に関して、堰表面には光合成生物が付着していなかった。よって、越流水が外側水槽内に溜まった水に落ちたときの飛沫による堰表面へのぬれ効果が光合成生物の付着に与える影響は低いと考えられる。

堰番号 3,4,5,6 番に関しては、堰表面に光合成生物が付着していた。水が堰に沿って流れる位置(赤線)と同様の形状に光合成生物が付着している。2章で示したように、この付着位置は第二沈殿池で観察された光合成生物の付着と同様の位置であり、このことから、堰のエッジから伝った水が堰の表面を覆う適度な湿りが光合成生物の付着を促す効果を持つと考えられる。

本研究における光合成生物の付着実験は、付着を促すために意図的で行ったものであり、第二沈殿池における堰表面に水分をもたらす原因とは断定できない。しかし、屋外に設置されている第二沈殿池では、風等による外乱的要素や越流流量の変化などにより堰表面を沿って流れる原因となる要素は多く存在すると考えられる。

三角堰からの越流流量の変化による三角堰表面のぬれ具合について、越流流量を $Q=8.29[\text{L/min}]$, $Q=5.17[\text{L/min}]$, $Q=1.50[\text{L/min}]$, $Q=0.58[\text{L/min}]$, $Q=0.20[\text{L/min}]$ と変化させた時のそれぞれの越流挙動を Fig. 4.14~Fig. 4.18 に示す。これら越流流量は簡易的に測定したため、大よその値となるが、越流時の挙動に変化が見られるように設定した。

Fig. 4.14 では、越流流量が多い場合に堰表面を沿う流れが生じない(完全水脈)ことが見て取れた。

Fig. 4.15 では、Fig. 4.14 と比べ越流流量が減少したことにより、堰中央部分を沿う流れが生じていることが見て取れた。堰中央部分を沿う流れは、時間経過後も堰表面に広がって流れる様子は見られず、第2章で述べたような堰中央部分に付着がない状態との関連性があると考えられる。

Fig. 4.16 では、Fig. 4.14, Fig. 4.15 と比べ大幅に越流流量が減少したことにより、越流水は常に堰を沿う流れである。越流に勢いがないため、水面に落ちる前に堰表面に落ちる(付着水脈)ことで、ハの字形の流れが生まれている。

Fig. 4.17, Fig. 4.18 では、Fig. 4.16 のように常に堰を沿う流れである。また、付

着水脈が堰上面方向になったことにより、ハの字形の流れがより顕著に見て取れる。

以上の結果をより、越流流量が低下したとき、ハの字形の流れが生まれたと考えられる。そして、このハの字形の流れによる堰表面の水分が三角堰に付着する光合成生物がハの字形をしている要因の一つであると考えられる。また、越流流量が $Q=5.17[\text{L/min}]$ 付近において堰表面の中央部分を沿う流れがあり、この流れが光合成生物を堰表面から剥離させることが、Fig. 2.2 のように堰表面の中央部分の光合成生物の付着が少ない要因の一つと考えられる。また、堰表面の中央部分を沿う流れは Fig. 2.10 と類似しており、第二沈殿池においても同様の流れが存在する。このように流れによる藻類の剥離は多くにより報告されており^[11]、流れが光合成生物の剥離を促すことが知られている。

現場での光合成生物の付着は、越流流量の変化や風などによる外乱により、ハの字形の堰を沿う流れを生むことで光合成生物にとって繁茂しやすい条件となり、ハの字形の付着が起きると考えられる。また本研究では越流流量は一定であるが、水槽内で発生した光合成生物が越流出口で詰まることで、越流流量が減少しハの字形の流れ・付着が起きたと考えられる。

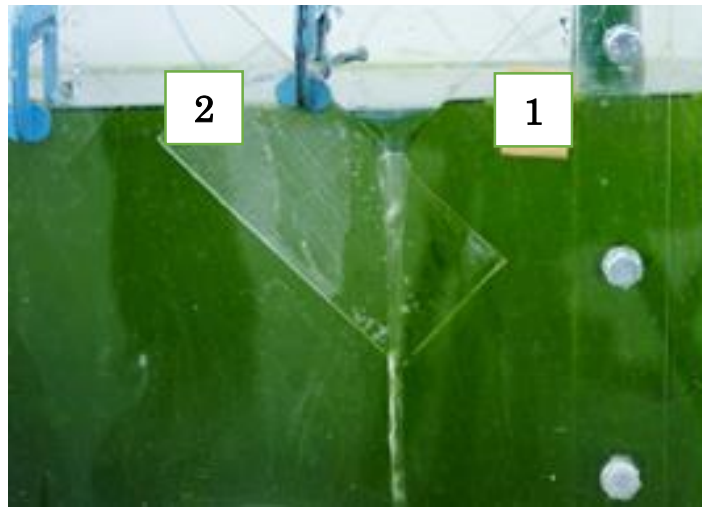


Fig. 4.8 weir1 and 2 (First day)

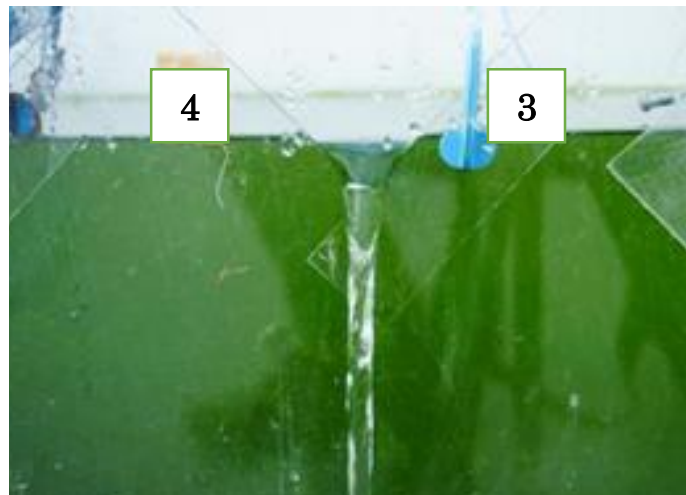


Fig. 4.9 weir3 and 4 (First day)

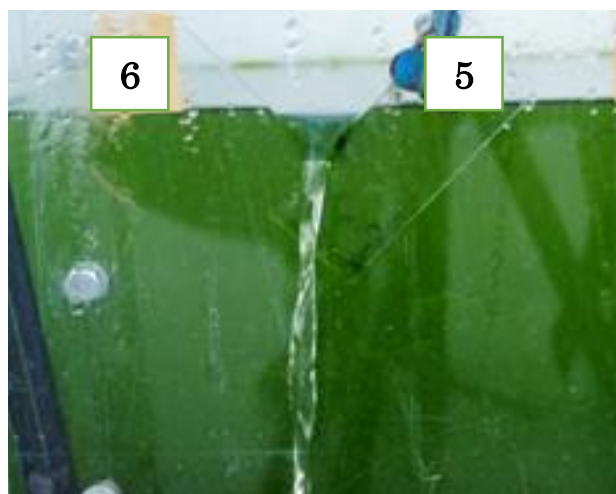


Fig. 4.10 weir5 and 6 (First day)



Fig. 4.11 weir1 and 2 (after17 days)



Fig. 4.12 weir3 and 4 (after17 days)

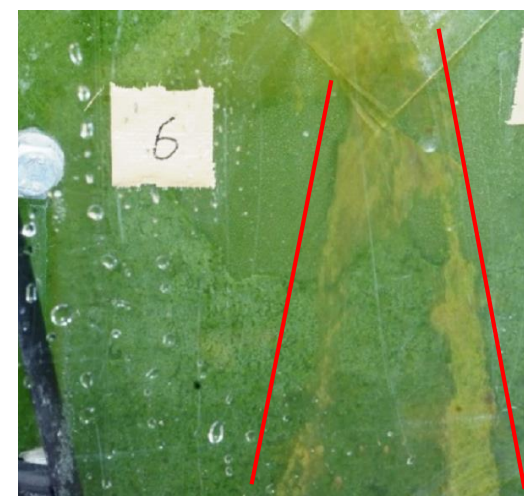
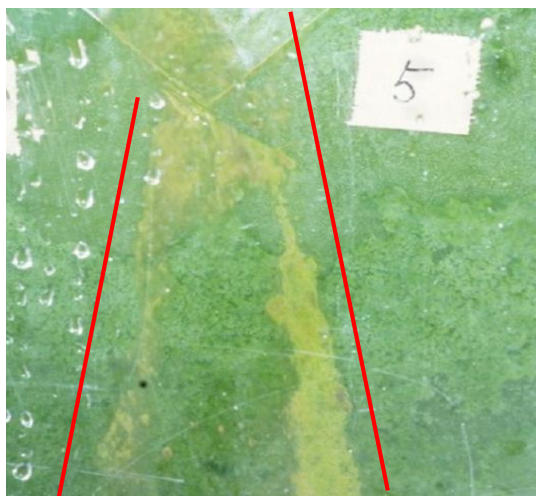


Fig. 4.13 weir5 and 6 (after 17 days)



Fig. 4.14 flow rate of overflow $Q=8.29[\text{L}/\text{min}]$



Fig. 4.15 flow rate of overflow $Q=5.17[\text{L}/\text{min}]$



Fig. 4.16 flow rate of overflow $Q=1.50[\text{L}/\text{min}]$

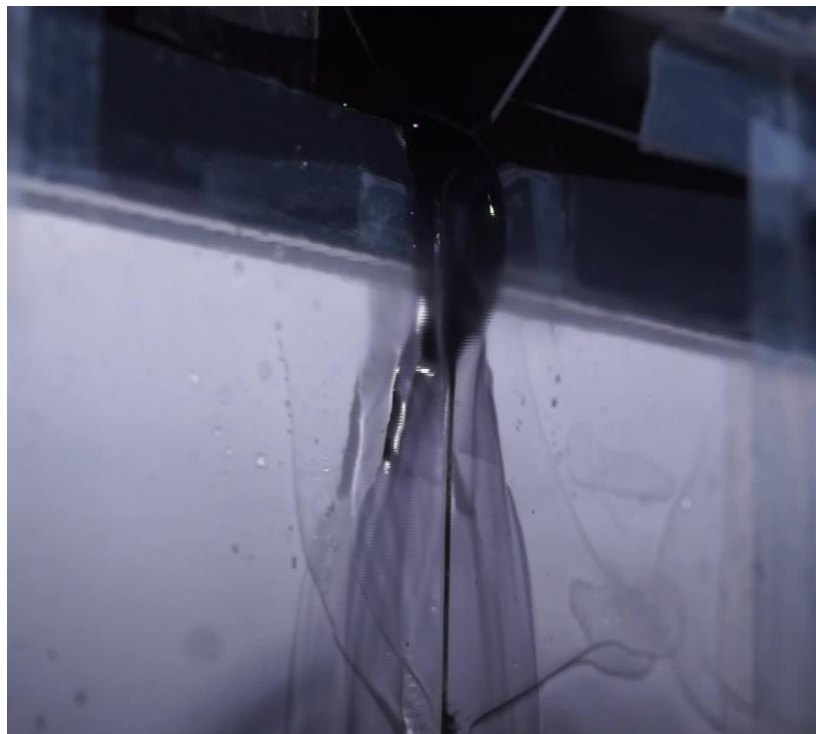


Fig. 4.17 flow rate of overflow $Q=0.58[\text{L}/\text{min}]$

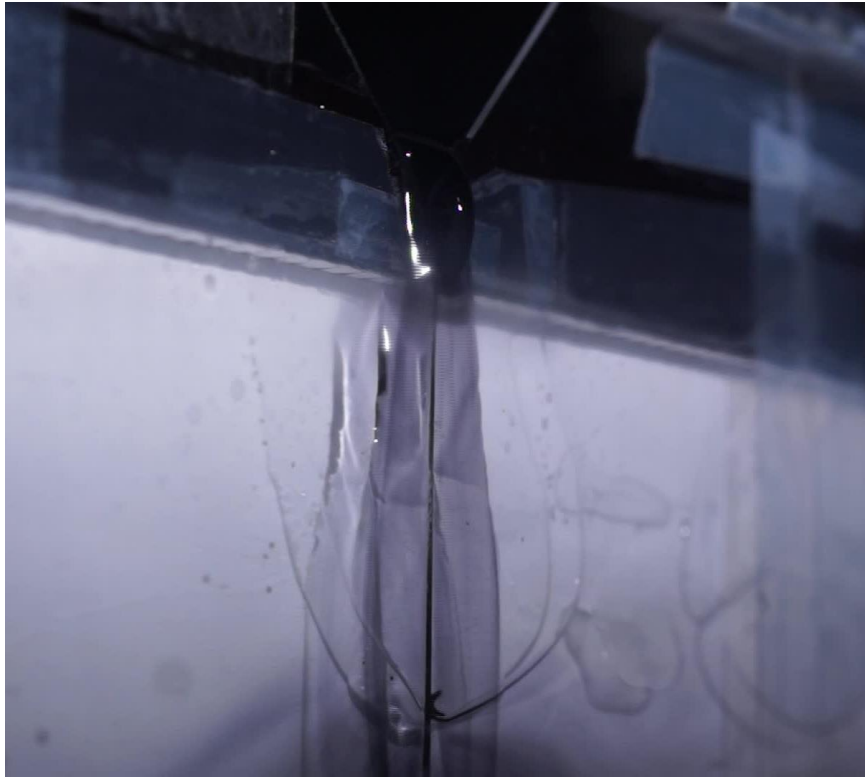
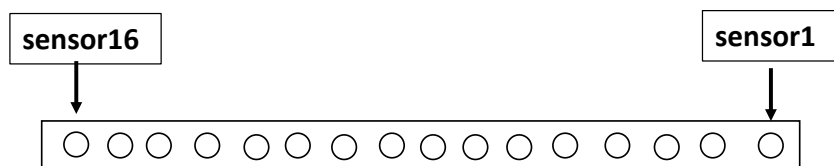
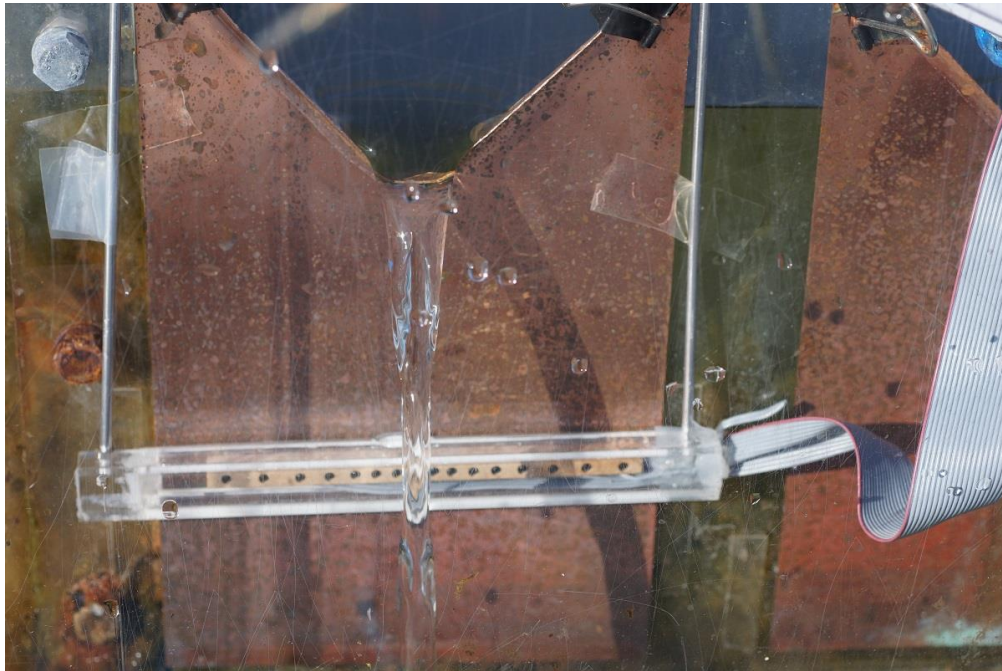


Fig. 4.18 flow rate of overflow $Q=0.20[\text{L}/\text{min}]$

4-2-2. 三角堰表面の照度分布と付着

Fig. 4.19 に三角堰に設置した照度センサーの写真を示す。Fig. 4.19 のように水脈がつくる影が堰表面に見られ、時間帯によって影が移動し影に覆われた部分の照度は他のセンサーに比べて低下する。Fig. 4.20 は、縦軸に各時間帯の照度平均から各センサー生データ照度の差の絶対値を一日分積算、横軸にセンサー位置（左右対称）を示した図を、堰表面に付着した光合成生物の写真と重ねている。図中の黒点は、設置したセンサーを表している。これにより、照度分布と付着の関係を考察した。

Fig. 4.20 より、照度の差が低い位置(sensor1~4 と sensor11~16 付近)は光合成生物の付着量が多いのに対し、照度の差が大きい位置(sensor7~10 付近)は光合成生物の付着が少ないことが分かる。このように、照度が昼間にかけて上昇するため水脈が作る影の影響を大きく受けてしまい、光合成生物の付着量が低下した可能性が考えられる。しかし、堰の中央部分の付着に関しては、照度による影響だけが付着との関係があるとは一概には言えないため、上述した堰を沿う流れの影響も付との関連があり、照度の影響と流れによる影響の二つが付着量と関係している可能性があると考えられる。



Sensor interval : 10 ,10 , 8, 7, 6 ,6, 5, 5, 5, 6, 6, 7, 8, 10, 10 [mm]

Fig. 4.19 Installation of sensors

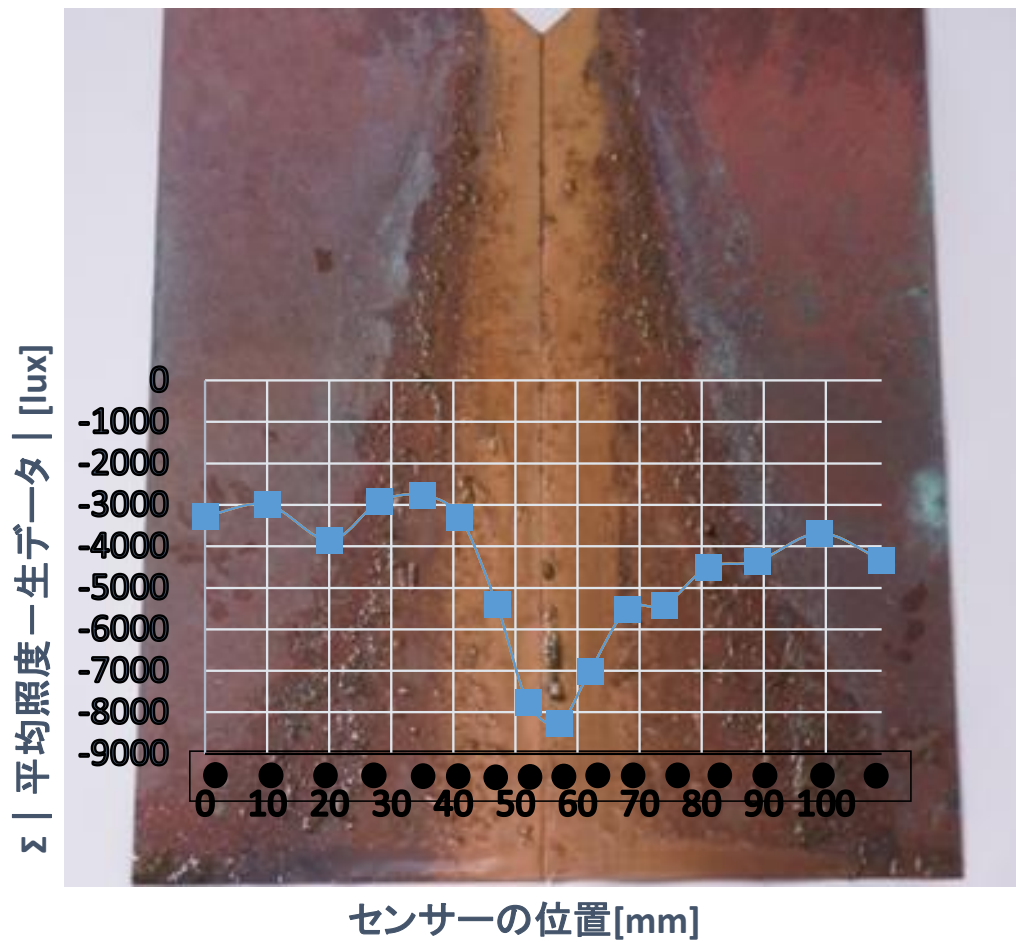


Fig. 4.20 Relation of adhesion and illumination

4-3. 三角堰への光合成生物の付着抑制実験

4-3-1. 表面処理による付着抑制

三角堰表面性状が光合成生物の付着に与える影響を調べるため数日間に渡り写真撮影し、その効果を写真により比較した。4月7日から水槽試験を開始し、3日後の4月10日に撮影した写真と(Fig. 4.21)、18日経過後の4月25日に撮影した堰表面の様子(Fig. 4.22)、及び40日経過後の5月17日に撮影した堰表面の様子(Fig. 4.23)を下記に示す。

堰番号6の防汚塗料が塗布された三角堰には光合成生物の付着は18日経過後では観察されなかったが、40日経過後の写真では堰の中央部分に光合成生物の付着が見られた。また、この部分には光合成生物から分泌される粘性物質を感じることができ、長期間使用した場合には効果が薄れることが実証された。

その他の三角堰(堰番号1~5)には試験開始後1週間程度経過してから、光合成生物から分泌される粘性物質により堰表面がヌメリを持つようになり、Fig. 4.22の実線で輪郭を示す*の範囲に光合成生物の色の淡い付着が観察された。その中では堰番号4の銅板への光合成生物の付着は18日経過時点では比較的抑制されていたが、40日経過後では実線で輪郭を示す*範囲に光合成生物が色濃く付着していた。また、銅板の中央部分への光合成生物の色の淡い付着が観察でき、これは2章で上述した第二沈殿池の三角堰における付着形状とも類似している。この原因として、Fig. 4.15のような越流水と堰表面が繋がる流れが生まれ、堰中央部分において堰を沿う流れの流速が増加したことで、光合成生物が付着しにくい環境であったと考えられる。

撥水塗料を塗布した堰番号2では比較用に設置したアクリル板との有意な差は見られなかった。この試験は、4月27日夜の八王子地区の停電により実験装置が一時停止してしまった。また、3月以降の気温上昇に対し、本水槽は表面処理効果実験中において冷却機能を備えておらず、日中は水温が30℃を越えていた。

次に、Fig. 3.13に示された実験条件での三角堰表面性状が光合成生物の付着に与える影響を調べるため数日間に渡り写真撮影し、その効果を写真により比較した。6月10日から水槽試験を開始し(Fig. 4.24)、40日経過後の7月18日に撮影した堰表面の様子(Fig. 4.25)を下記に示す。また、水槽試験の内容が上述と重複するものもあり、主に超撥水の効果について述べる。

Fig. 4.25より、堰番号1の超撥水については40日経過後も付着および堰表面へのぬれは観測されず、光合成生物の付着も抑制されたことが示された。これは、超撥水効果により水と堰面間の表面張力が抑制されることで、堰表面のぬれが抑制され、光合成生物の付着が抑制されたと考えられる。また、Fig. 4.25の堰番

号 6 の防汚塗料（中国塗料 バイオクリン）について，上述した水槽試験よりも少ない日数であるが光合成生物の色の濃い付着が見られるのは，この水槽実験よりも前に行われていた実験の積算の影響であり，防汚塗料の効果がより薄れたためと考えられる．この試験は，比較用写真の見易さを考慮し撮影方法を途中で変更した．



A. weir6 and 5



B. weir4 and 3



C. weir2 and 1

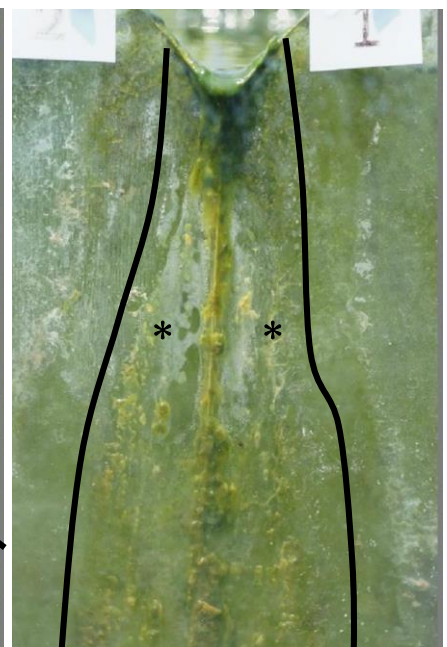
Fig. 4.21 after 3 days



B. weir6 and 5

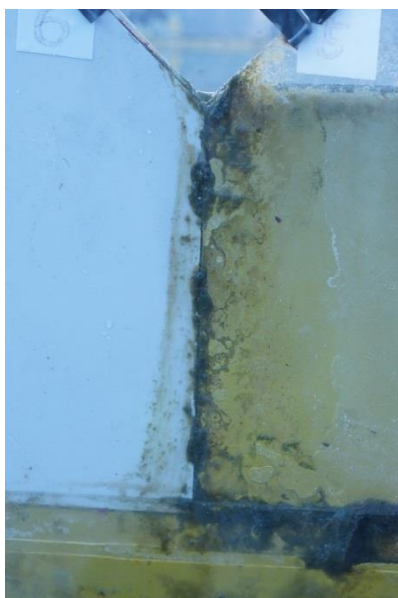


B. weir4 and 3

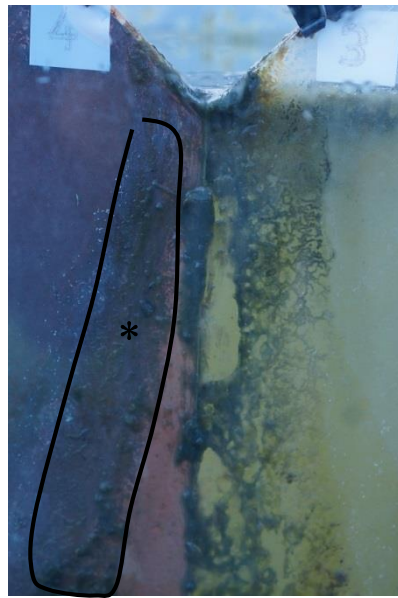


C. weir2 and 1

Fig. 4.22 after 18 days



A. weir6 and 5



B. weir4 and 3



C. weir2 and 1

Fig. 4.23 after 40 days

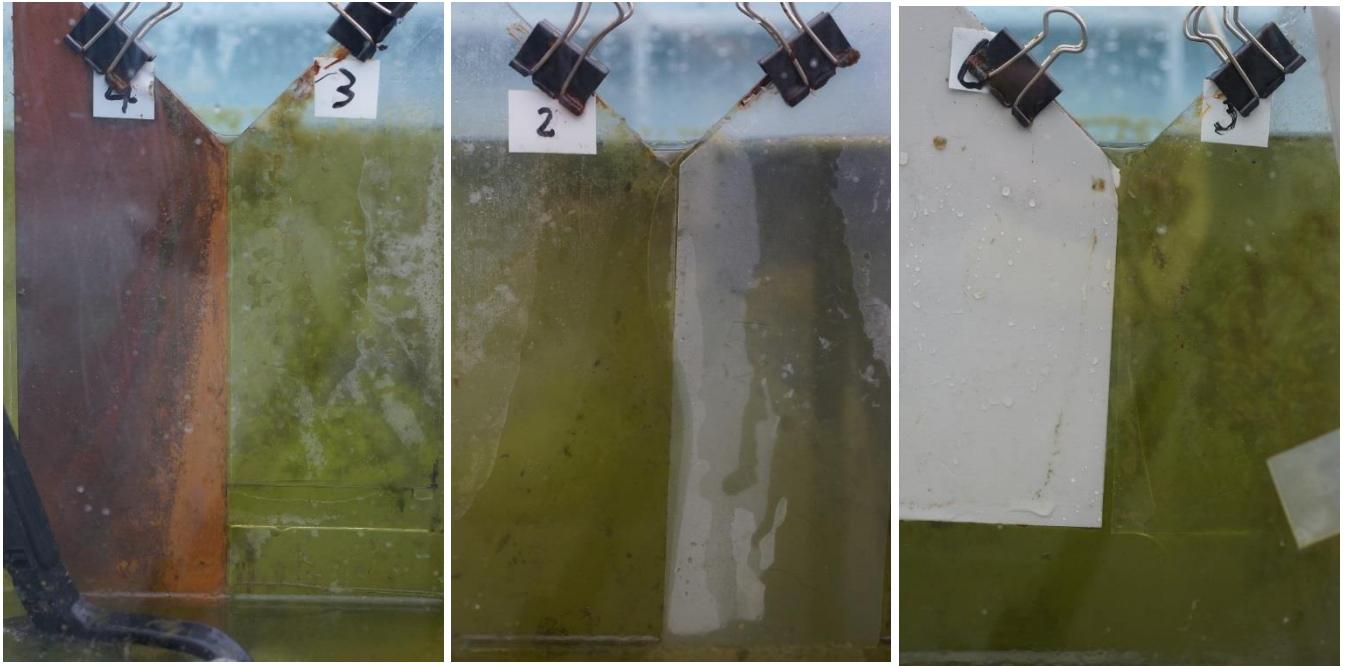


Fig. 4.24 First day

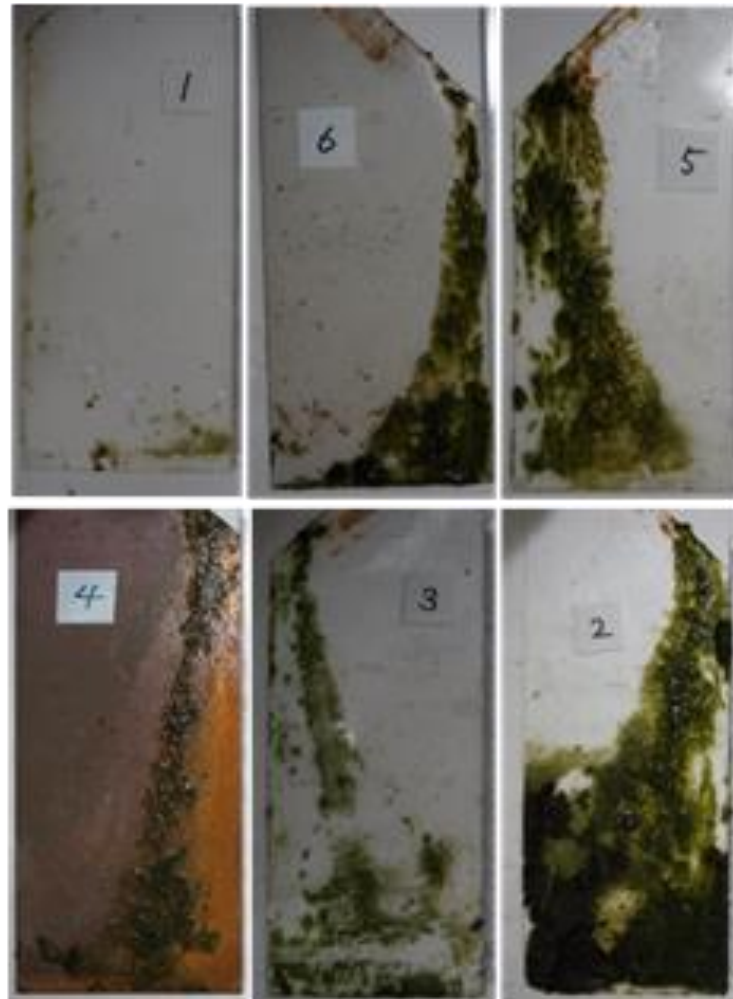


Fig. 4.25 after 40 days

4-3-2. 三角堰形状による三角堰表面のぬれ抑制

I. ひさしの設置

三角堰へひさしの設置による，三角堰表面のぬれ抑制が光合成生物の付着へ与える影響を調べるため数日間に渡り写真撮影し，その効果を写真により比較した．10月15日に水槽試験を開始し（Fig. 4.26），38日経過後の11月21日に撮影した堰表面の様子（Fig. 4.27）を下記に示す．ひさしを設置した位置の三角堰を比較用として，アクリル板および銅板も示す．

三角堰の越流部分にひさしを設置した部分である堰番号 1, 2 は，三角堰表面のぬれや光合成生物の付着は観察されなかった．この結果は，上述した本研究での三角堰越流部分における光合成生物の詰まりの影響で堰表面を沿うように流れる現象がひさしを設置したことで，堰表面を沿うことなく外側水槽へ落ちたためと考えられる．さらに，越流水は堰を越える流量が小さい場合，越流水の水平速度が低下し，堰面付近の空気を排除して低圧となり外気に押されることで水脈が堰板に付着するので水脈（ナップ）が堰下面に再付着する付着水脈を起こす⁹⁾が，この場合，水脈と堰面との距離はひさしにより広がっているため付着水脈が起きない．よって，堰を沿う流れが生じなかったと考えられる．



Fig. 4.26 First day



Fig. 4.27 after 38 days

II. 曲げ部を持つ三角堰

越流部分に曲げ部を持つ三角堰による、三角堰表面のぬれ抑制が光合成生物の付着へ与える影響を調べるため数日間に渡り写真撮影し、その効果を写真により比較した。12月26日に水槽試験を開始し (Fig. 4.29) , 22日経過後の1月16日に撮影した堰表面の様子 (Fig. 4.30) , 30日経過後の写真を (Fig. 4.31) を下記に示す。また、作製した三角堰の全体写真 (Fig. 4.28) も下記に示す。

実験開始から22日後の写真より、曲げ部長さ0mmの銅板三角堰には光合成生物の色の淡い付着、曲げ部長さ6.28mmには堰表面を沿う流れがあったと見られる跡が観察できた。これにより、曲げ部長さ6.28mmでは堰表面のぬれ効果によって光合成生物が付着する可能性があると考えられる。

その後、実験開始から30日経過後の写真では (Fig. 4.31) , 曲げ部長さ6.28mmの堰中央部分に光合成生物が色の淡い付着をしているのが見てとれる。これは、22日経過後に見られた堰表面を沿う流れの跡が存在していたことから分かるように、堰表面がぬれることで光合成生物の付着に至ったと考えられる。これらに比べ、曲げ部長さ9mmの銅板三角堰には越流流量が低下した場合でも、曲げ部の長さの差で付着水脈が生じず、光合成生物の付着および堰表面を流れた跡は無いことが観察できた。これは、Iで述べたように三角堰に曲げ部を持たせたことで付着水脈が生じず、光合成生物の付着が観測されなかったと考えられる。曲げ部長さ6.28mmに関しては、曲げ部を持たせたものの堰表面との距離が近く、水脈が大気に押し潰される形となり、水脈が堰表面に付着し堰表面を流れた跡が観察されたと考えられる。

実験開始から44日経過後の写真では (Fig. 4.32) , 曲げ部長さ0mmおよび6.28mmについては30日経過後と比較して傾向は変わらず色の淡い付着をしていた。また曲げ部長さ9mmについては堰中央部分に水脈の跡が見られた。このように付着水脈が生じた原因として、堰出口部分に付着した光合成生物の付着が流量の低下をもたらしたことが考えられる。しかし、堰出口部分に付着した光合成生物も時間経過とともに剥離し、流量低下が抑制されたと考えられ、同時に付着水脈も抑制され光合成生物の付着まで至らなかったと考えられる。

よって、堰表面のぬれを抑制し光合成生物の付着を抑制する新たな手法として曲げ部長さ9mmの銅板三角堰が有効であると考えられる。



(a) 曲げ部長さ 0mm



(b) 曲げ部長さ 6.28mm



(c) 曲げ部長さ 9mm

Fig. 4.28 Overall view of a triangular weir



(a) 曲げ部長さ 0mm



(b) 曲げ部長さ 6.28mm



(c) 曲げ部長さ 9mm

Fig. 4.29 First day



(a) 曲げ部長さ 0mm



(b) 曲げ部長さ 6.28mm



(c) 曲げ部長さ 9mm

Fig. 4.30 after 22 days



(a) 曲げ部長さ 0mm



(b) 曲げ部長さ 6.28mm



(c) 曲げ部長さ 9mm

Fig. 4.31 after 30 days



(a) 曲げ部長さ 0mm



(b) 曲げ部長さ 6.28mm



(c) 曲げ部長さ 9mm

Fig. 4.32 After 44 days

・第5章 結論

現場調査を行い、生息する光合成生物の同定、水温や湿度等を管理することで第二沈殿池と類似した環境を作成した。

光合成生物の付着原因を調査し付着抑制実験で新たな抑制効果を示すため調査を行った。三角堰への光合成生物の付着実験により、第二沈殿地の三角堰に付着する光合成生物のハの字形の付着が、越流流量の変化により生じる堰表面を沿う流れが堰表面の適度な湿り気を生むことで三角堰への光合成生物の付着を促すことが示された。また、堰中央部分において付着が減少していることに関して、 $Q=5.17[L/min]$ 付近において生じる堰中央部分を流れによる影響と、越流によって生じる水脈の影の影響で照度が低下することで、付着が減少する可能性が考えられる。

三角堰への光合成生物の付着抑制実験では、超撥水处理による抑制実験では、付着およびぬれの抑制が示された。防汚塗料処理による抑制実験では、約40日経過後では抑制が確認されたが、長期に使用した場合効果が薄れることが示された。三角堰表面へのぬれを抑制する新たな手法として、ひさしの設置や三角堰に曲げ加工を施した。それにより、堰表面へのぬれが抑制され同時に光合成生物の付着も抑制された。曲げ部長さによる比較では、6.28mmと9mmを比較すると曲げ部長さ9mmの方が付着水脈を抑えることができ、堰表面のぬれを抑制できるため光合成生物の付着が抑制される結果が示された。このような三角堰形状による付着を抑制する方法は、化学的抑制のような環境への負荷を考えなくて良く、簡易的に抑制できるため実用的であると考えられる。

・参考文献

- [1] 茂庭竹生, 上下水道工学, コロナ社, pp.117-120, pp165-194, (2007)
- [2] 舩岡茂, 生物付着と防汚—防汚システム開発の一つの捉え方, 塗料の研究 (152), 47-51, 2010-10, (2010)
- [3] 高橋玲樹, 稲垣修一, 中島昌二, 発電プラント向け海生生物付着防止システム, 東芝レビューVol.57No.6, (2002)
- [4] 黒田大介, 鎌倉渚, 伊藤日出生, 生貝初, 兼松秀行, 開放型循環式冷却塔の冷却水槽に浸漬した金属材料への微生物付着, (社)日本鉄鋼協会会報 98(4), 109-116, 2012
- [5] Asif Matin, Z. Khan, S.M.J. Zaidi, M.C. Boyce, Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination: Phenomena and prevention, Desalination 281, 1-16, (2011)
- [6] 木村直人, 岩泉孝司, 光半導体による藻類の付着防止, 衛生工学シンポジウム論文集, 2: 323-328, (1994)
- [7] 鈴木穰, 岡安祐司, 下水処理水修景利用における藻類増殖抑制技術の付着藻類への効果について, 独立行政法人土木研究所, (2009)
- [8] In-BeomKo, Tatsuya Noike, Use of blue optical filters for suppression of growth of algae in hydrogen producing non-axenic cultures of Rhodobacter sphaeroides RV, International Journal of Hydrogen Energy 27, 1297-1302, (2002)
- [9] 物部長穂, 水理学, 岩波書店, pp.218-219, (1950)
- [10] 中山有, 神田学, 木内豪, 下水処理場での水温観測に基づく都市下水道の水・熱輸送に関する研究, 水文・水資源学会誌, No.20 Vol.1, pp.25-33, (2007)
- [11] 皆川朋子, 福嶋悟, 付着性藻類の流れやすさは種によって異なるのでしょうか, 土木研究所 自然共生研究センター研究レポート, 2003

謝辞

本論文は首都大学東京大学院 理工学研究科 機械工学専攻における 2013 年 4 月から 2015 年 3 月までの研究成果をまとめたものである。

本研究を進めるにあたり、首都大学東京大学院 理工学研究科 機械工学専攻 水沼博教授には終始懇切丁寧な御指導及び御鞭撻を頂き、深く感謝致しますと共に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、首都大学東京大学院 理工学研究科 機械工学専攻 小原弘道助教授には終始懇切丁寧な御指導及び御鞭撻を頂き、深く感謝致しますと共に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、首都大学東京大学院 理工学研究科 機械工学専攻 吉田真助教授には終始懇切丁寧な御指導及び御鞭撻を頂き、深く感謝致しますと共に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、筑波技術大学 産業技術学部 産業情報学科 下笠賢二准教授には金型の作製をして頂き、深く感謝致しますと共に厚く御礼申し上げます。

本研究を行うにあたり、首都大学東京大学院 理工学研究科 生命科学専攻 村上哲明教授と東京大学 理学系研究科 生物化学専攻 野崎久義准教授には第二沈殿地より採取した藻類の同定をして頂き、この場を借りて深く感謝致しますと共に厚く御礼申し上げます。

本研究科における研究生活の中で、多くの御助言や激励の言葉を頂きました首都大学東京大学院 理工学研究科 機械工学専攻 Sandi Sufiandi 修士，朱俊方修士，大畑祐介学士，豊田亮太学士，宮永恭学士，菊池駿介君，森戸規之君，若松賢吾君の皆様に深く感謝致しますと共に厚く御礼申し上げます。

二年間の研究生活な中で共に研究に励み、互いに議論し、多くの意見を頂いた大谷直輝学士，小林裕樹学士，畠山拓学士の皆様に深く感謝致しますと共に，研究以外の日常生活においても共に有意義な時間を過ごす事が出来ました事を心から嬉しく思います。

最後に、私をいつも暖かく見守り励ましてくれた父 洋次郎，母 智子，厳しいながらも気に掛けてくれた兄 賢治に心から感謝致します。

1. 金型図面

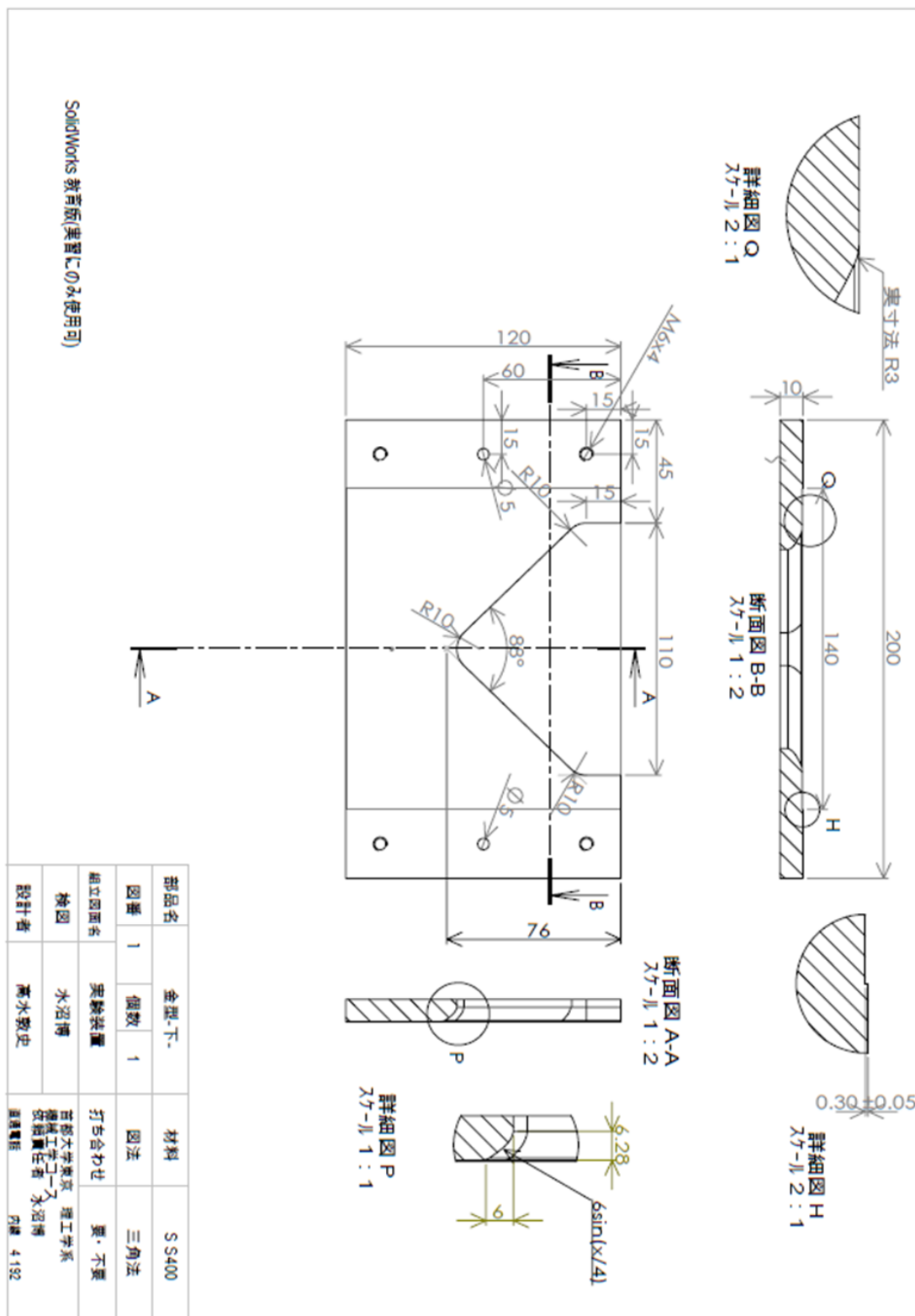


Fig. 6.1 Die drawing (die bottom)

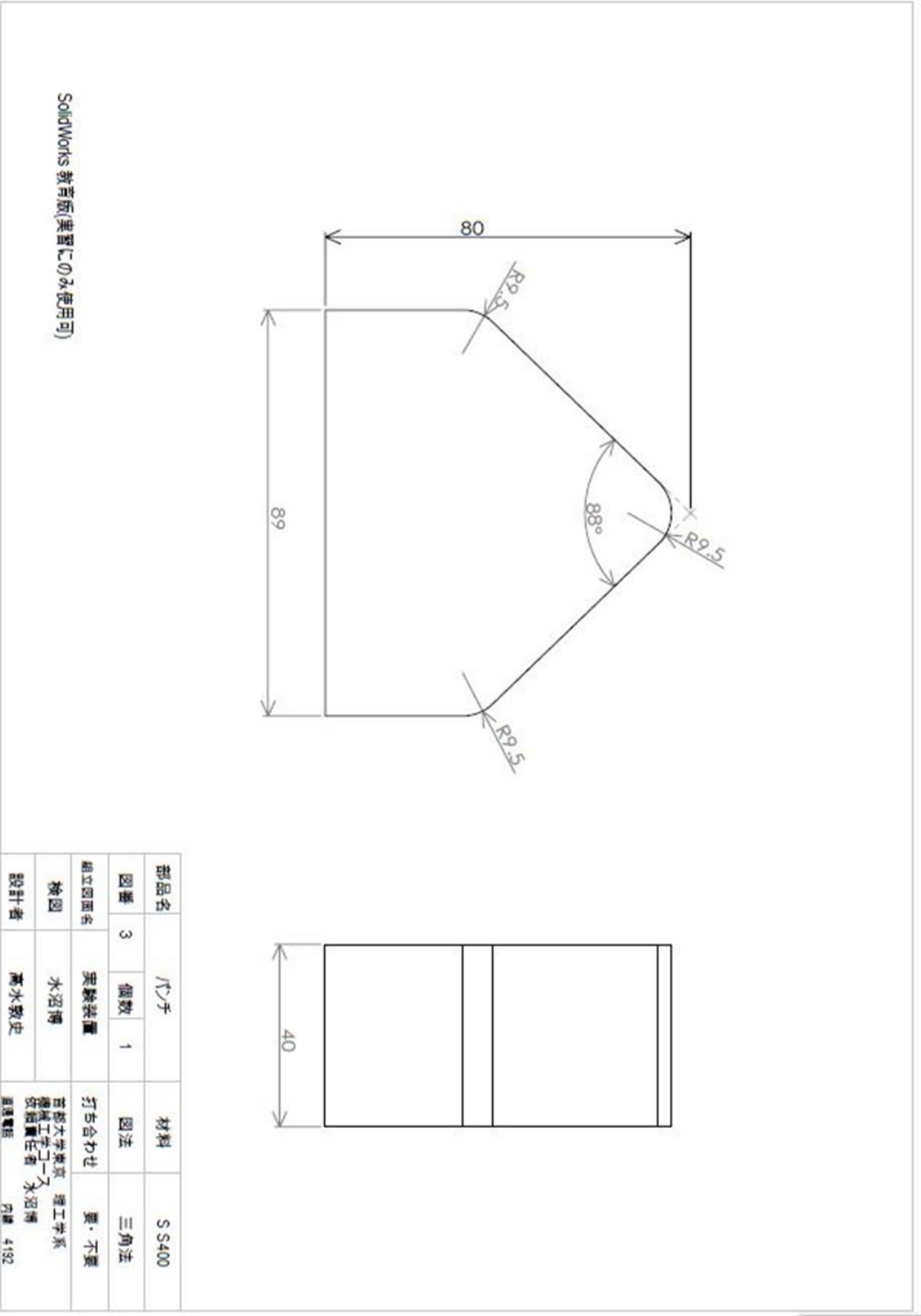


Fig. 6.3 Punch for dies

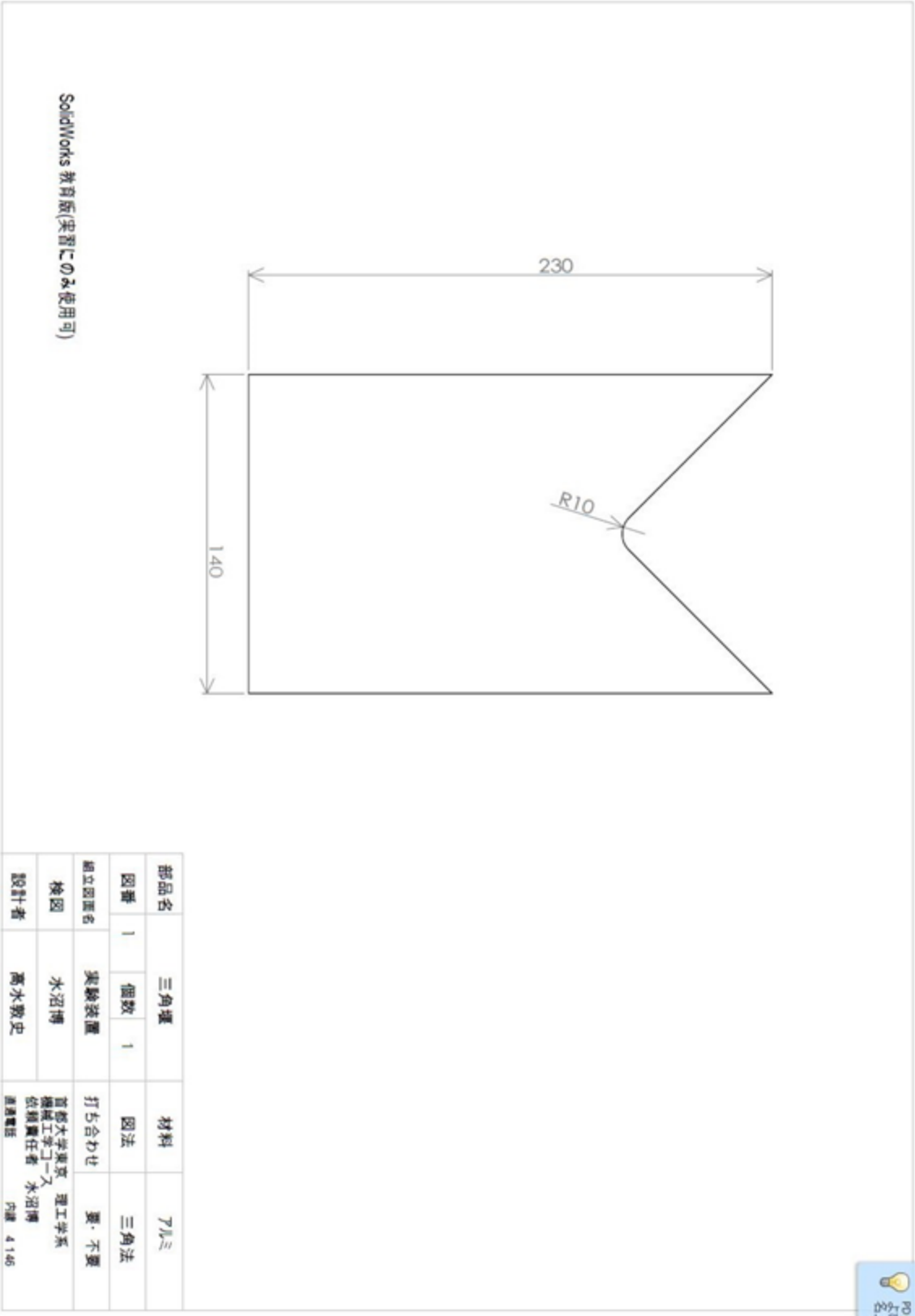


Fig. 6.4 Triangle weir for dies

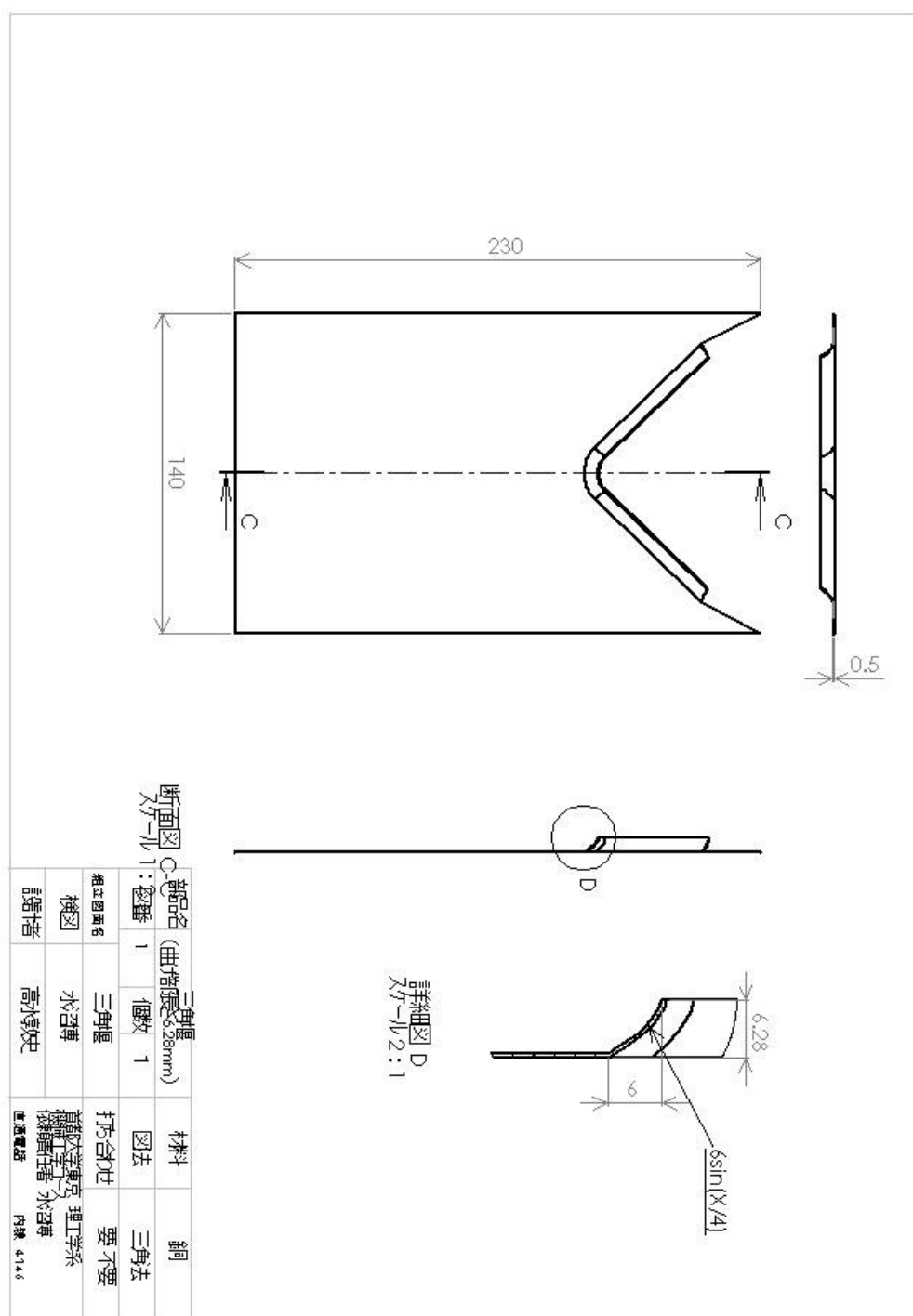


Fig. 6.5 Triangular weir (bend length 6.28mm)

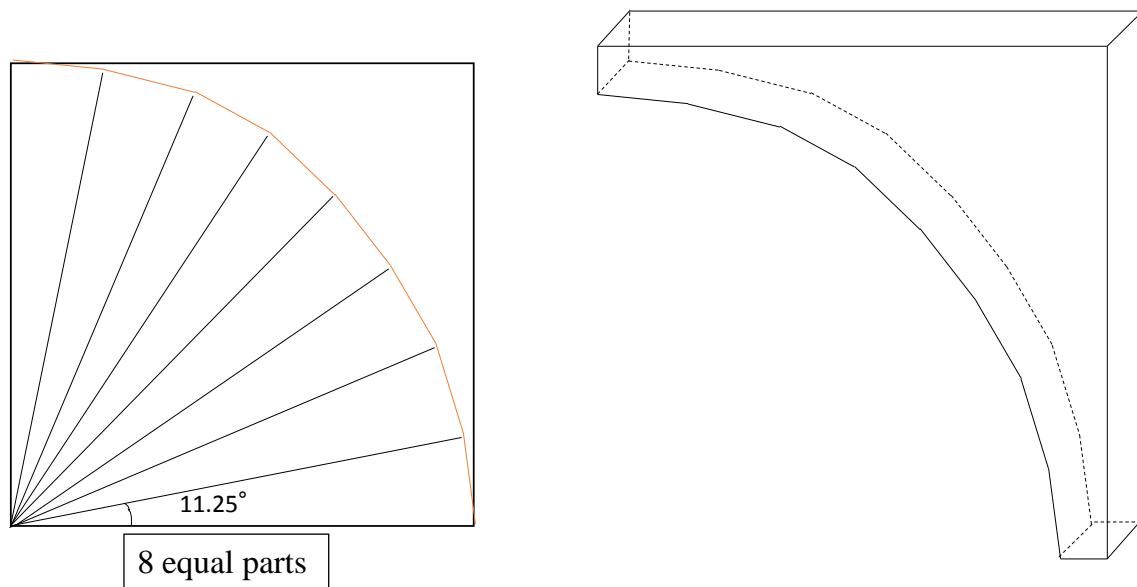


Fig. 6.7 Jig for hand finish